

TREBALL FINAL DE GRAU

**Grau en Enginyeria Elèctrica**

**DISSENY D'UNA SÈRIE DE MOTORS D'EFICIÈNCIA IE5**



**Memòria i Annexos**

<b>Autor:</b>	Ricard Coma Coll
<b>Director:</b>	Ramon Bargalló Perpiñà
<b>Convocatòria:</b>	Maig de 2018



## Resum

Durant el transcurs d'aquest projecte es realitza el disseny d'una màquina síncrona de reluctància amb una elevada eficiència energètica, de manera que obtingui la qualificació de IE5 de la IEC (International Electrotechnical Commission).

Inicialment, a partir del Software de codi obert **SyR-e** es selecciona una geometria tant pel rotor com per l'estator de la màquina. Aquesta serà la més òptima per tal de disminuir la rissada del parell resultant tant com sigui possible. A continuació, s'implementa el software d'elements finits **FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics)** per tal d'analitzar electromagnèticament i tèrmica la màquina seleccionada en primera instància i mostrar-ne els resultats obtinguts. Després de la comprovació de la viabilitat del motor, es presenten els càlculs de les corbes característiques de la màquina, a partir de càlculs analítics, tenint en compte la variació del flux magnètic depenent de les posicions del rotor. Finalment, es realitza un càlcul d'una sèrie dels diferents motors de la mateixa manera que s'obtindrien d'aquesta màquina, només modificant-ne la longitud de l'empilat i el bobinat. Així doncs, es presentaran motors de diferents potències en dues gammes diferents: una a 3000 rpm i un altra a 1500 rpm.

Al document també s'hi presenten les pautes de càlcul utilitzades i la bibliografia necessària pel desenvolupament d'aquest treball.

**Paraules Clau:** *Màquina; Motor; Síncron; Reluctància; Magnètic; Tèrmic; Optimització; SyR-e; FEMM; Eficiència IE5.*





## Resumen

Durante el transcurso de este proyecto se realiza el diseño de una máquina síncrona de reluctancia con una elevada eficiencia energética, de modo que obtenga la calificación de IE5 de la IEC (International Electrotechnical Commission).

Inicialmente, a partir del Software de código abierto **SyR-e** se selecciona una geometría tanto por el rotor como por el estator de la máquina. Ésta será la más óptima para disminuir la rizada del par resultante tanto como sea posible. A continuación, se implementa el software de elementos finitos **FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics)** para analizar electromagnética y térmicamente la máquina seleccionada inicialmente y mostrar los resultados obtenidos. Tras la comprobación de la viabilidad del motor, se presentan los cálculos de las curvas características de la máquina, a partir de cálculos analíticos, teniendo en cuenta la variación del flujo magnético dependiendo de las posiciones del rotor. Finalmente, se realiza un cálculo de una serie de los diferentes motores de la misma manera que se obtendrían de esta máquina, sólo modificando la longitud del apilado de chapas y el bobinado. Así pues, se presentarán motores de diferentes potencias en dos gamas diferentes: una a 3000 rpm y otra a 1500 rpm.

En el documento también se presentan las pautas de cálculo utilizadas y la bibliografía necesaria para el desarrollo de este trabajo.

**Palabras Clave:** *Máquina; motor; síncrono; reluctancia; magnético; térmico; optimización; SyR-e; FEMM; Eficiencia IE5.*



## Abstract

Throughout this project, the design of a Synchronous Reluctance Machine with great energetic efficiency is carried out, in order to obtain the IE5 rating of the IEC (International Electrotechnical Commission).

Initially, with the Open Source Software SyR-e, a geometry is selected both by the rotor and by the stator of the machine. This will be the most optimal to reduce the ripple of the resulting torque as much as possible. Next, the finite element software FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics) is implemented to analyze electromagnetically and thermally the initially selected machine, as well as to show the obtaining results. After checking the viability of the engine, the calculations of the characteristic curves of the machine are presented, based on analytical processes, taking into account the variation of the magnetic flux depending on the positions of the rotor. Finally, a series of the different engines are calculated in the same way that would be obtained from this machine, only by modifying the length of the stack and the winding. Consequently, engines of different powers will be presented in two different ranges: one at 3000 rpm and another at 1500 rpm.

The document also presents the calculation guidelines used and the bibliography necessary for the development of this work.

**Keywords:** *Machine; motor; synchronous; reluctance; magnetic; thermal; optimization; SyR-e; FEMM; Efficiency IE5.*



## Agraïments

A en Ramon Bargalló, per la seva atenció i orientacions donades durant la realització del projecte.

A en Narcís Turull, pel cop de mà donat amb la correcció ortogràfica de la memòria.

A tots aquells i aquelles que m'heu donat suport i ànims en algun moment d'aquests últims anys del meu pas per la universitat.

Moltes gràcies!





## Glossari

<b>A<sub>s</sub></b> : capa de corrent [A/m]	<b>P<sub>Fe</sub></b> : pèrdues al ferro [W]
<b>aa</b> : nombre de conductors en paral·lel	<b>P<sub>2</sub></b> : potència útil [W]
<b>B<sub>e</sub></b> : inducció mitjana a l'entreferro [T]	<b>P<sub>in</sub></b> : potència absorbida [W]
<b>cofi<sub>n</sub></b> : factor de potència nominal	<b>P<sub>cu</sub></b> : pèrdues al coure [W]
<b>cos(φ)<sub>N</sub></b> : factor de potència nominal	<b>P<sub>fe</sub></b> : pèrdues al ferro [W]
<b>CPSR</b> : contant <i>Power Speed Range</i>	<b>P<sub>FeR</sub></b> : pèrdues al ferro del rotor [W]
<b>d<sub>c</sub></b> : diàmetre del fil [mm]	<b>P<sub>FeS</sub></b> : pèrdues al ferro de l'estator [W]
<b>D<sub>e</sub></b> : diàmetre intern de l'estator [m]	<b>P<sub>Joule</sub></b> : pèrdues per efecte Joule [W]
<b>D<sub>ext</sub></b> : diàmetre exterior de la carcassa [m]	<b>P<sub>N</sub></b> : potència nominal [W]
<b>entref</b> : valor de l'entreferro calculat [mm]	<b>P<sub>out</sub></b> : potència útil [W]
<b>E<sub>fn</sub></b> : eficiència nominal [%]	<b>P<sub>u</sub></b> : potència útil [W]
<b>f</b> : freqüència [Hz]	<b>PF</b> : factor de potència
<b>f<sub>d</sub></b> : flux directe [Wb]	<b>Q</b> : nombre de ranures de l'estator
<b>f<sub>q</sub></b> : flux en quadratura [Wb]	<b>R<sub>s</sub></b> : resistència d'una fase [Ω]
<b>F<sub>o</sub></b> : factor d'ocupació de la ranura	<b>s<sub>c</sub></b> : secció del conductor calculada [mm <sup>2</sup> ]
<b>f<sub>s</sub></b> : freqüència síncrona nominal [Hz]	<b>S<sub>C</sub></b> : secció del conductor escollida [mm <sup>2</sup> ]
<b>g<sub>g</sub></b> : entreferro escollit [mm]	<b>S<sub>ocupada</sub></b> : superfície ocupada pels conductors [mm <sup>2</sup> ]
<b>h</b> : coeficient de convecció [W/(m <sup>2</sup> ·°C)], [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	<b>S<sub>r</sub></b> : secció de la ranura [mm <sup>2</sup> ]
<b>I<sub>d</sub></b> : corrent eix directe [A]	<b>S<sub>v</sub></b> : superfície de ventilació [m <sup>2</sup> ]
<b>I<sub>ph</sub></b> : corrent de fase [A]	<b>T</b> : parell [Nm]
<b>I<sub>n</sub></b> : corrent nominal [A]	<b>U<sub>max</sub></b> : tensió màxima donada pel rectificador trifàsic [V]
<b>I<sub>s</sub></b> : corrent de fase valor de pic [A]	<b>U<sub>n</sub></b> : tensió nominal del motor [V]
<b>I<sub>q</sub></b> : corrent eix de quadratura [A]	<b>U<sub>red</sub></b> : tensió màxima donada per la xarxa elèctrica [V]
<b>K<sub>e</sub></b> : relació entre el valor màxim i l'eficaç de la tensió	<b>v</b> : velocitat de l'aire [m/s]
<b>K<sub>i</sub></b> : relació entre el valor màxim i l'eficaç del corrent	<b>V<sub>cu</sub></b> : volum del coure [m <sup>3</sup> ]
<b>K<sub>l</sub></b> : relació longitud-diàmetre	<b>V<sub>FeR</sub></b> : volum del ferro del rotor [m <sup>3</sup> ]
<b>K<sub>p</sub></b> : coeficient de forma de la potència	<b>V<sub>FeS</sub></b> : volum del ferro de l'estator [m <sup>3</sup> ]
<b>k<sub>w</sub></b> : factor de bobinat	<b>VHG<sub>cu</sub></b> : densitat de pèrdues al coure [W/m <sup>3</sup> ]
<b>L</b> : longitud de l'empilat [m]	<b>VHG<sub>FeR</sub></b> : densitat de pèrdues al ferro del rotor [W/m <sup>3</sup> ]
<b>L<sub>fe</sub></b> : longitud de l'empilat escollida [m]	<b>VHG<sub>FeS</sub></b> : densitat de pèrdues ferro de l'estator [W/m <sup>3</sup> ]
<b>L<sub>sc</sub></b> : intensitat de curtcircuit [A]	<b>Z<sub>r</sub></b> : conductors per fase
<b>L<sub>cap</sub></b> : longitud del cap de bobina [mm]	<b>Z<sub>r</sub></b> : nombre de conductors de cada ranura
<b>L<sub>car</sub></b> : longitud de la carcassa [m]	<b>Z<sub>t</sub></b> : nombre total de conductors
<b>m</b> : nombre de fases	<b>Δ</b> : densitat de corrent [A/mm <sup>2</sup> ]
<b>M</b> : parell [Nm]	<b>ΔT</b> : increment de temperatura
<b>M<sub>N</sub></b> : parell nominal [Nm]	<b>η</b> : rendiment [pu], [%]
<b>N<sub>b</sub></b> : velocitat base [rpm]	<b>η<sub>N</sub></b> : rendiment nominal
<b>N<sub>N</sub></b> : velocitat nominal [rpm]	<b>λ<sub>d</sub></b> : flux directe [Wb]
<b>N<sub>mec</sub></b> : velocitat mecànica [rpm]	<b>λ<sub>q</sub></b> : flux en quadratura [Wb]
<b>N<sub>sim_max</sub></b> : velocitat màxima de la simulació [rpm]	<b>μ<sub>0</sub></b> : permeabilitat del buit = 4π · 10 <sup>-7</sup> [N/A <sup>2</sup> ]
<b>N<sub>scale</sub></b> : escala de la simulació	<b>ω</b> : velocitat angular elèctrica [rad/s]
<b>N<sub>spin</sub></b> : velocitat de centrifugat [rpm]	<b>ω<sub>b</sub></b> : velocitat base angular [rad/s]
<b>N<sub>wash</sub></b> : velocitat objectiu [rpm]	<b>ω<sub>n</sub></b> : velocitat nominal angular [rad/s]
<b>p</b> : parell de pols	
<b>P<sub>fm</sub></b> : pèrdues [W]	





# Índex

Resum	I
Resumen	III
Abstract	V
Agraïments	VII
Glossari	IX
1. Introducció	5
1.1. Objectius del treball.....	5
1.2. Antecedents .....	5
1.3. Abast del treball .....	6
2. La màquina Síncrona de Reluctància	7
2.1. Parts d'un motor elèctric .....	7
2.1.1. Estator .....	7
2.1.2. Rotor.....	8
2.2. Principi de funcionament dels motors de reluctància.....	9
2.3. Alimentació del motor de reluctància. ....	10
2.3.1. Una mica d'història .....	10
2.3.2. Principi d'alimentació de la màquina.....	10
3. Base pel disseny del motor elèctric de Reluctància	11
3.1. Eina SyR-e.....	12
3.2. Dades Inicials.....	12
3.2.1. Nombre de pols i bobinat.....	13
3.2.2. Determinació de la tensió i el corrent nominal .....	13
3.2.3. Determinació de les dimensions del rotor i l'entreferro .....	13
3.3. Primers Resultats.....	16
3.3.1. Sèrie de motors resultant.....	16
3.4. Elecció de la solució .....	20

3.4.1. Geometria i característiques del motor escollit .....	20
4. Anàlisi per Elements Finites del Motor Tipus .....	25
4.1. Anàlisi Magnètica .....	25
4.1.1. Importació de la geometria de la màquina .....	25
4.1.2. Caracterització del problema .....	27
4.1.3. Determinació del punt de parell màxim .....	33
4.1.4. Saturació de la màquina i parell resultant .....	34
4.1.5. Parell girant .....	35
4.1.6. Pèrdues.....	37
4.2. Anàlisi Tèrmica amb Elements Finites.....	39
4.2.1. Determinació de la geometria del motor .....	39
4.2.2. Caracterització del problema .....	42
4.2.3. Resultats de les simulacions.....	48
5. Rendiment i corbes característiques del Motor tipus .....	53
5.1. Determinació de les corbes mitjançant el mètode de la variació de flux	53
5.2. Presentació de les corbes característiques de la màquina .....	55
5.2.1. Intensitats característiques en funció de la velocitat de rotació .	56
5.2.2. Parell en funció de la velocitat de rotació.....	57
5.2.3. Potència entregada en funció de la velocitat de rotació .....	58
5.2.4. Eficiència en funció de la velocitat de rotació .....	58
5.2.5. Voltatge en funció de la velocitat de rotació .....	59
6. Càlcul de la sèrie de motors .....	61
7. Desenvolupament de la sèrie .....	67
7.1. Resultats de la sèrie.....	67
7.2. Viabilitat de la sèrie .....	68
8. Anàlisi de l'impacte ambiental .....	71
Conclusions .....	73
Pressupost i/o Anàlisi Econòmica .....	75
Bibliografia .....	79

<b>ANNEXOS</b>	<b>81</b>
<b>A. CÀLCULS (DIMENSIONAMENT I CARACTERÍSTIQUES)</b>	<b>83</b>
<b>B. CÀLCUL DE PÈRDUES MAGNÈTIQUES (MODEL DE BERTOTTI)</b>	<b>141</b>
<b>C. OBTENCIÓ D'UNA GEOMETRIA ÒPTIMA MITJANÇANT SyR-e</b>	<b>149</b>
<b>D. CODIS LUA EMPRATS A LA SIMULACIÓ AMB ELEMENTS FINITS</b>	<b>173</b>
<b>E. PLÀNOLS</b>	<b>183</b>
<b>F. DOCUMENTACIÓ D'INTERÈS</b>	<b>187</b>



# 1. Introducció

## 1.1. Objectius del treball

L'objectiu principal d'aquest projecte serà el disseny d'una sèrie de motors Síncrons de Reluctància amb una **elevada eficiència energètica** per obtenir la qualificació **IE5**.

A nivell general es buscarà:

- **Dissenyar un motor tipus.**
- **Comprovar mitjançant simulacions de la viabilitat de la màquina tipus.**
- **Presentar les característiques de la màquina tipus.**
- **Presentar les característiques d' una sèrie de motors a 3000 i 1500 rpm-**

A nivell més específic l'objectiu serà que la màquina tipus resultant presenti un **parell amb una baixa oscil·lació** (Rissada) i per tant el parell sigui el màxim estable.

## 1.2. Antecedents

El treball no parteix de zero pel que fa al disseny de la màquina Síncrona de Reluctància: existeix diversa documentació al respecte i, en els darrers anys, la investigació en aquest camp està donant nombrosos fruits.

El document base en què s'ha centrat aquest treball és: *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors* (PELLEGRINO et al., 2016). També s'ha buscat suport en altra documentació dins del camp de les màquines síncrones de reluctància o amb imants permanents, adjunta a la bibliografia.

### **1.3. Abast del treball**

Així, de manera sintètica es podria resumir el contingut d'aquest treball en:

- Introducció a les màquines síncrones de reluctància: característiques principals, principi de funcionament i alimentació d'aquestes.
- Base pel disseny d'un motor elèctric de reluctància a partir de l'eina SyR-e (optimització de la geometria del rotor per disminuir la rissada).
- Elecció de les característiques del motor tipus i simulació magnètica i tèrmica mitjançant elements finits (FEMM).
- Presentació de les característiques de la màquina tipus i determinació de la seva viabilitat.
- Càlcul i desenvolupament de la sèrie de motors de diferents potències.
- Anàlisi de l'impacte ambiental del projecte i estudi econòmic de la creació d'un prototip.
- Càlcul del cost econòmic del desenvolupament dels prototips de la sèrie de motors.

## 2. La màquina Síncrona de Reluctància

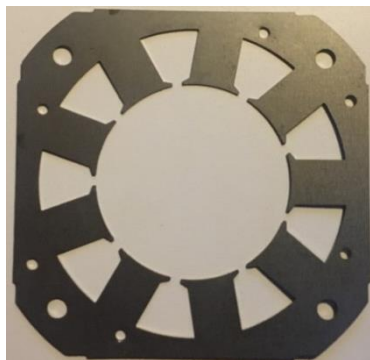
### 2.1. Parts d'un motor elèctric

Un motor elèctric de reluctància és una màquina elèctrica que està conformada per dues parts essencials: el rotor i l'estator.

Com bé indiquen els seus noms, l'estator és la part que es manté fixa: generalment és externa i limita amb la carcassa; mentre que, per la seva banda, el rotor és la part mòbil i normalment està situada dins de l'estator.

#### 2.1.1. Estator

Com bé s'ha indicat amb anterioritat és la part estàtica del motor. Conté el sistema inductor de la màquina elèctrica, o sigui: el nucli magnètic (conformat per l'apilament de xapes); i el bobinat inductor, que bàsicament són fils de coure enrotllats al voltant de les dents.



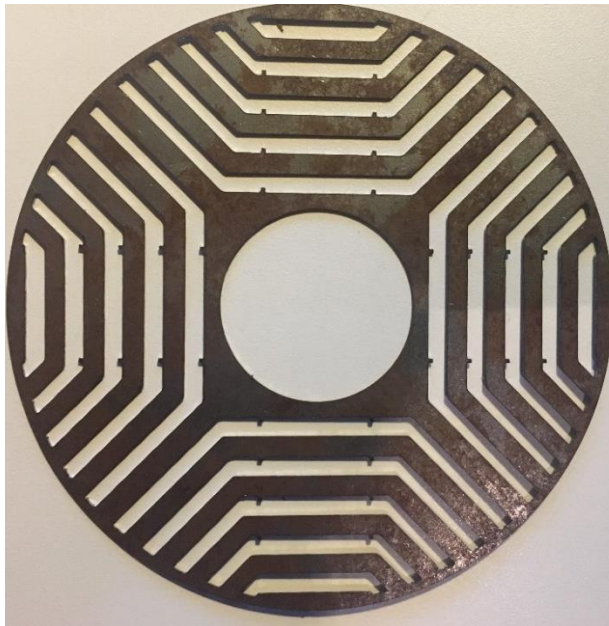
<https://goo.gl/images/W9Jviu>

**Figura 2.1.** Imatges, Xapa de l'estator (Font: pròpia) i estator amb bobinat (Font: Google Imatges)

- **Nucli magnètic:** Apilament de xapes d'acer silici amb propietats ferromagnètiques. Estan mecanitzades de manera que queda una corona exterior i una sèrie de dents a l'interior. Les característiques principals d'aquesta part del motor són: dimensions dels diàmetres interior i exterior, nombre de ranures i dimensions de les ranures.
- **Bobinat inductor:** Està format per tres bobines de coure (una per fase) repartides entre les ranures de la xapa del rotor. Les característiques d'aquesta part són: nombre d'espores per bobina, nombre de conductors, diàmetre dels conductors i nombre de pols.

### 2.1.2. Rotor

És la part mòbil del motor, separada de l'estator per l'entreferro (discontinuitat de la xapa formada d'aire): a dins del seu diàmetre interior s'hi encaixarà l'eix que transmetrà el moviment giratori a l'exterior. Constitueix el sistema induït i les seves parts són: el nucli magnètic i l'eix.



**Figura 2.2.** Imatge, Xapa del rotor (Font: pròpia)

- **Nucli magnètic:** Igual que l'estator, està format per xapes d'acer silici amb característiques ferromagnètiques. Dins del rotor d'una màquina síncrona de reluctància s'hi troben diversos camins d'aire (més endavant es parlarà del seu dimensionat).
- **Eix:** Generalment, és d'acer inoxidable de característiques no ferromagnètiques. L'eix travessa longitudinalment encaixat al diàmetre interior del rotor i queda subjecte per coixinets a la carcassa.

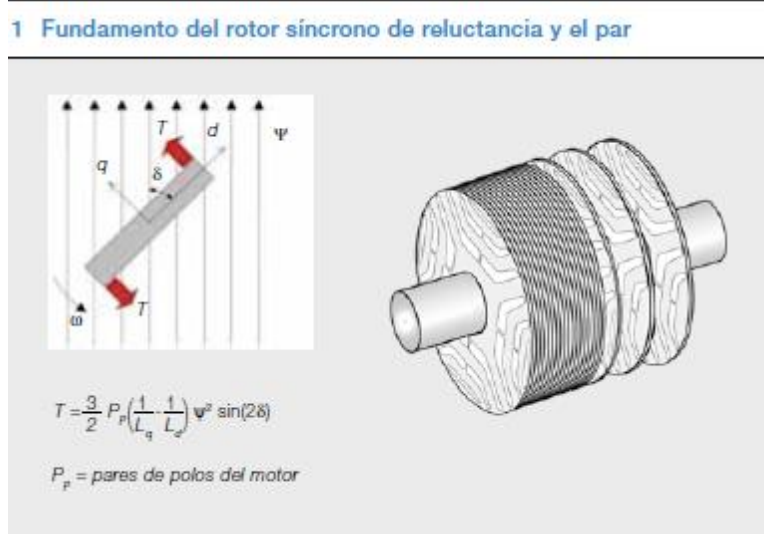


## 2.2. Principi de funcionament dels motors de reluctància

En general, la Màquina Síncrona de reluctància (SynRel, d'ara en endavant) pot aproximar el seu funcionament al dels Motors d'Inducció o Motors Asíncrons. Aquestes màquines estan molt esteses i amb múltiples aplicacions a l'actualitat, atesa la seva robustesa i baix cost.

*La reluctància magnètica seria l'equivalència magnètica a la resistència elèctrica, el rotor de la màquina presenta una direcció de resistència magnètica mínima (d) i una direcció perpendicular (q) a aquesta, amb una reluctància magnètica alta. El parell d'aquesta màquina es produeix quan el rotor intenta alinear la direcció de conducció magnètica amb el camp generat a l'estator. (Font: Revista ABB 1|2011 (HEINZ LENDENMANN, REZA R. MOGHADDAM, ARI TAMMI 2011))*

*La força del parell resulta proporcional a l'índex de saliència, és a dir, a la relació de inductàncies entre les dues direccions magnètiques del rotor.*



**Figura 2.3.** Gràfic il·lustratiu del funcionament del motor síncron de reluctància (Font: Revista ABB 1|2011 (HEINZ LENDENMANN, REZA R. MOGHADDAM, ARI TAMMI 2011))

A diferència de les màquines d'inducció (Asíncrons), les SynRel presenten una major eficiència amb unes dimensions més reduïdes, mantenint la robustesa i la versatilitat d'aquests motors tan emprats.

## 2.3. Alimentació del motor de reluctància.

En no tenir capacitat d'arrencada directa connectant-se directament a la xarxa aquesta part resulta fonamental per aquesta tipologia de motors.

### 2.3.1. Una mica d'història

Esmentar que fins les últimes dècades (abans dels 80) aquest motors s'estudiaven poc i bàsicament a nivell teòric i experimental, ja que l'electrònica de potència no estava prou desenvolupada per tal de comandar aquestes màquines síncrones de manera efectiva.

És a partir de l'any 1976, amb l'auge de l'electrònica de potència, que aquestes màquines SynRel comencen a prendre interès científic, sobretot els motors de Reluctància commutada. Però l'ús es veu limitat per la gran rissada que presenta el parell i la quantitat de soroll que generen.

Ja entrada la dècada dels 90 la SynRel comença a agafar força i es posiciona com una clara competidora de la màquina Asíncrona. A l'actualitat l'empresa ABB té una línia completa de motors que van de 1,1 kW a 500 kW amb gran eficiència i per tot tipus d'aplicacions industrials.

### 2.3.2. Principi d'alimentació de la màquina.

A causa de la incapacitat de generar parell fora de la velocitat de sincronisme, les màquines síncrones no es poden arrencar connectant-se directament a xarxa i, per tant, han d'anar pilotades per electrònica de control.

Concretament el control emprat pel motor del present projecte serà l'anomenat MTPA (Maximum Torque Per Ampere). Aquest control es basa en la variació de la intensitat, el voltatge i la freqüència d'una alimentació elèctrica de caràcter sinusoïdal.

El sistema de control bàsicament varia el paràmetres en funció de la posició del rotor, generant una variació de camps magnètics que són les que generen el moviment giratori del motor i la obtenció del Parell.

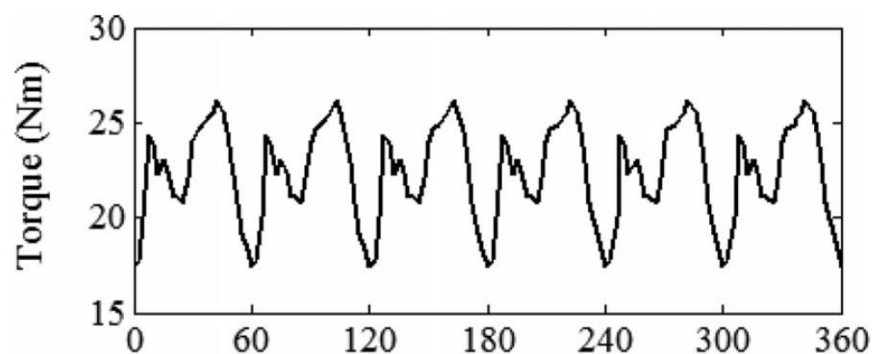
**Nota:** Per més informació de l'alimentació del motor vegeu la bibliografia adjunta, concretament: *MTPA and field weakening control of synchronous reluctance motor* (Ferdous et al. 2017).

### 3. Base pel disseny del motor elèctric de Reluctància

Aquest treball acadèmic no parteix de zero pel que fa al disseny de la màquina SynRel. Actualment, la investigació en el camp de les màquines elèctriques està explorant el món de les màquines de reluctància i, per tant, s'aprofitaran treballs fets prèviament com a base.

Concretament s'agafa com a referència treballs (adjunts a la biografia) de Francesco CUPERTINO i Gianmario PELLEGRINO, que a l'hora serveixen de base per a la creació del codi del projecte **SyR-e (Synchronous Reluctance evolution)** Que es basa en un programa fet amb codi lliure de Matlab/Octave que enllaça amb l'eina de simulació per elements finits FEMM.

La utilització d'aquesta eina es justifica perquè en aquest tipus de màquines es dona una problemàtica principal: el parell presenta una rissada considerable i més encara en un motor de bobinat concentrat, com serà el cas del present projecte.



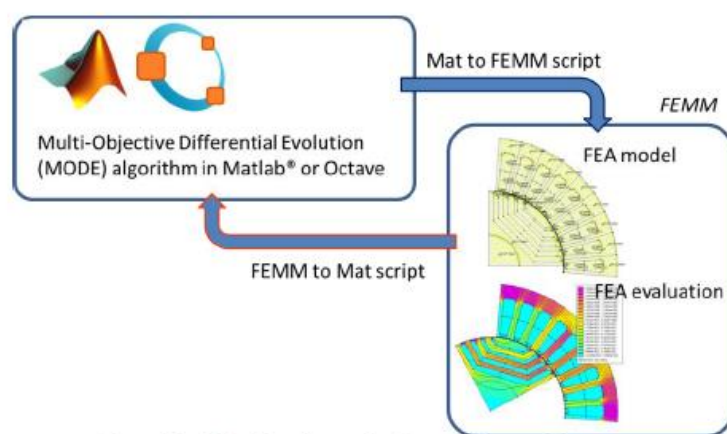
**Figura 3.1.** Gràfic del parell en funció de la velocitat d'una màquina SynRel amb gran rissada (Font: Design and Validation of a Synchronous Reluctance Motor With Single Tooth Windings (Spargo et al. 2015) )

Així, l'objectiu principal de la utilització de SyR-e serà la optimització dels camins d'aire del rotor per tal de disminuir tant com sigui possible la rissada al parell resultant de la màquina.

**Nota:** Consultant la bibliografia adjunta es pot obtenir una idea més clara de la problemàtica amb la rissada del parell i l'optimització dels camins d'aire del rotor per tal de disminuir-la.

### 3.1. Eina SyR-e

Tal i com defineix al seu manual d'ús, **SyR-e** és un eina basada en codi obert desenvolupada per ser executada amb els programes **Matlab/Octave**, capaç de generar un disseny automàtic d'una màquina SynRel. El seu principi de funcionament es basa amb la combinació de l'anàlisi per Elements Finitos i la optimització de paràmetres amb algorismes que treballen amb multi-objectius.



**Figura 3.2..** Gràfic conceptual funcionament SyR-e (Font: Manual SyR-e)

L'eina parametriza tota la geometria d'un motor i, mitjançant la variació d'aquesta cerca, aconseguir un disseny que compleixi uns objectius prèviament configurats.

**Nota:** Es pot trobar un manual sobre l'ús d'aquesta eina en els annexos adjunts a aquest projecte.

### 3.2. Dades Inicials

En aquest apartat es descriuen les principals característiques de la màquina SynRel, que es dissenyarà com a màquina tipus al llarg d'aquest projecte.

Les característiques principals de la màquina seran:

<b>Potència (P)</b>	0,75 kW	<b>Parell (M)</b>	2,39 Nm
<b>Velocitat (N)</b>	3000 rpm	<b>Tensió (V)</b>	130 V
<b>Freqüència (f)</b>	250 Hz	<b>Intensitat (I)</b>	2,62 A
<b>Diàmetre Ro (D)</b>	811 mm	<b>Empilat (L)</b>	75 mm

**Taula 3.1.** Valors inicials de la màquina elèctrica a dissenyar.

### 3.2.1. Nombre de pols i bobinat

Amb les dades anteriors es determina el nombre de parells de pols de la màquina:

$$p = \frac{f}{n} * 60 = \frac{250}{3000} * 60 = 5 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

El resultat és de 5 parells de pols: la màquina serà de **10 pols**.

El bobinat de la màquina serà del tipus bobinat concentrat.

### 3.2.2. Determinació de la tensió i el corrent nominal

Per tal de determinar el corrent nominal que sortirà del convertidor de la màquina, és necessari tenir en compte el rendiment de la màquina. Tal i com indica el títol del treball, es busca una eficiència IE5: com es pot trobar a les taules de la normativa IE, aquesta eficiència ha de ser d'un 86,3 %, com a mínim.

A la sortida del rectificador s'obtindrà una tensió de fase de 130 V. Per tal de determinar la intensitat nominal s'aplica:

$$I_n = \frac{P}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \text{cofi}} = \frac{750}{3 \cdot 130 \cdot 0,863 \cdot 0,85} = 2,62 \text{ A} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

On:

$P$ : és la potència nominal del motor;

$m$ : és el nombre de fases;

$\eta$ : és el rendiment de la màquina;

$\text{cofi}$ : és el factor de potència de la màquina.

### 3.2.3. Determinació de les dimensions del rotor i l'entreferro

L'últim pas previ a la introducció de les dades al SyR-e serà el càlcul de les dimensions del rotor. La següent expressió en possibilita el càlcul del diàmetre:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_i \cdot K_p \cdot K_l \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

On:

K són les constants de les que depèn el corrent i la seva forma i prenen els valors:

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_l := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

**K<sub>l</sub>** és la relació longitud-diàmetre i pren el valor:

$$K_l := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

**A<sub>s</sub>** és la capa de corrent que pot tenir un valor d'entre 35 i 65000 A/m

$$A_s := 2000 \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

**B<sub>e</sub>** és el valor de la inducció a l'entreferro i pren el valor de 0,7 Wb

Els altres valors ja són coneguts dels apartats anteriors.

Finalment, l'expressió en resulta:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_l \cdot K_p \cdot K_l \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.079 \text{ m} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

O sigui: uns 79mm, ajustant amb un entreferro de 3mm, quedarà determinat un De de 81 mm, ja que el software SyR-e presenta unes dades inicials aproximades d'aquest valor

L'altra dimensió a calcular serà la longitud de la màquina, o sigui, l'empilat de xapes de ferro necessari perquè la màquina doni la potència requerida.

$$D_e := 0.0811 \quad \text{m}$$

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_I \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.04 \quad \text{m}$$

Esmentar que aquesta dimensió (L) no serà necessària per fer les simulacions inicials amb SyR-e.

Per a més detalls, podeu consultar l'Annex de Càlcul.

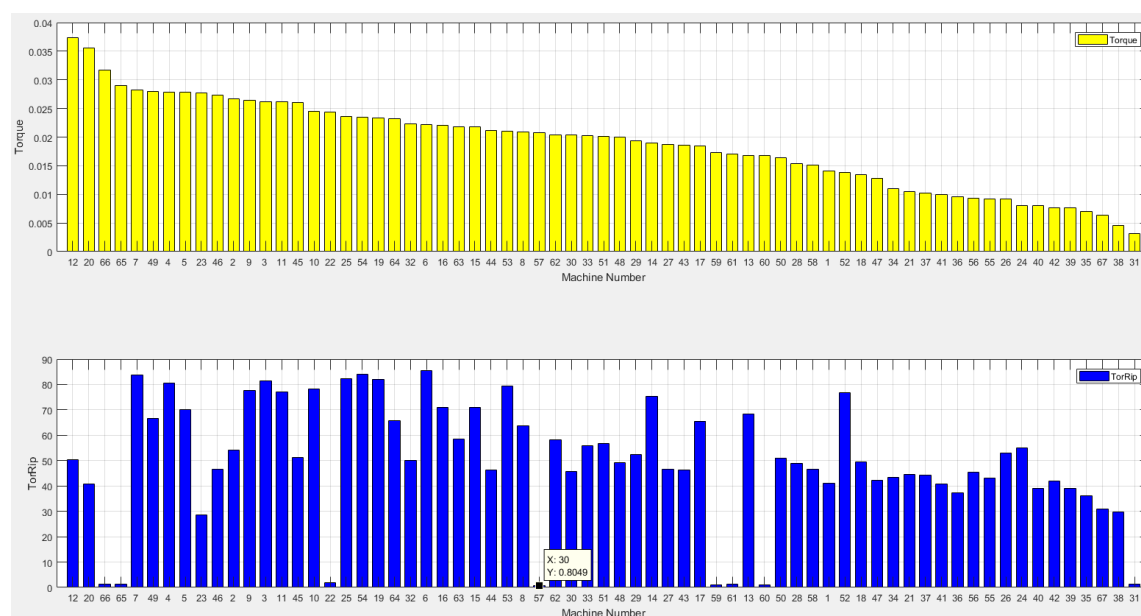
### 3.3. Primers Resultats

Un cop llançades diverses simulacions amb el programa SyR-e s'ha escollit una determinada geometria pel que fa al rotor i l'estator del motor. Per l'elecció s'ha usat el criteri de buscar la màquina amb una rissada de parell més baixa.

#### 3.3.1. Sèrie de motors resultant

Un cop realitzada la simulació el programa treu diverses gràfiques característiques de diferents màquines, a continuació es mostren aquests resultats.

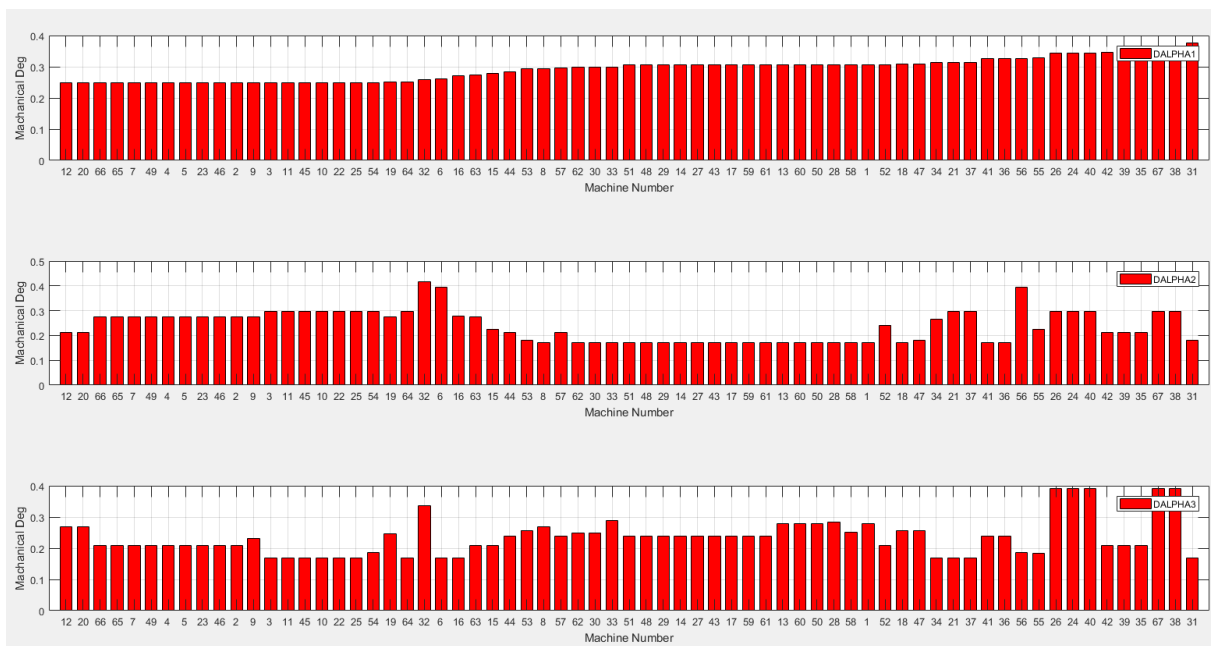
Resultats segons – parell i rissada:



**Figura 3.3.** Gràfiques de les màquines resultants: parell i rissada (Font: Pròpia).



Resultats segons la geometria del rotor:

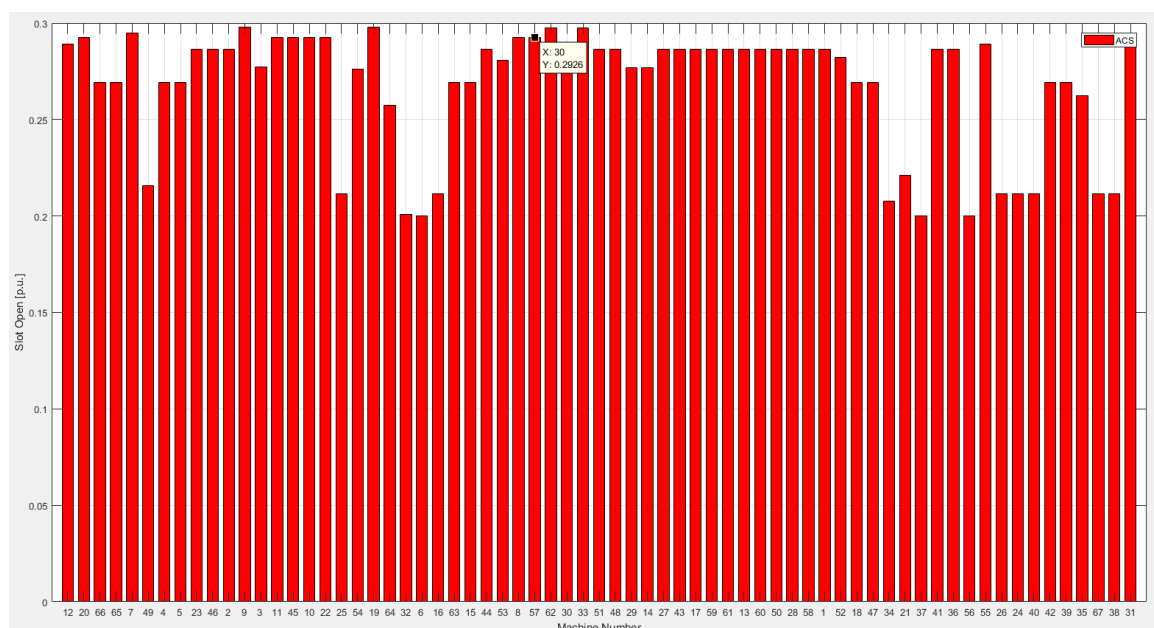


**Figura 3.4.** Gràfiques de les màquines resultants: valors d'Alfes (Font: Pròpia).

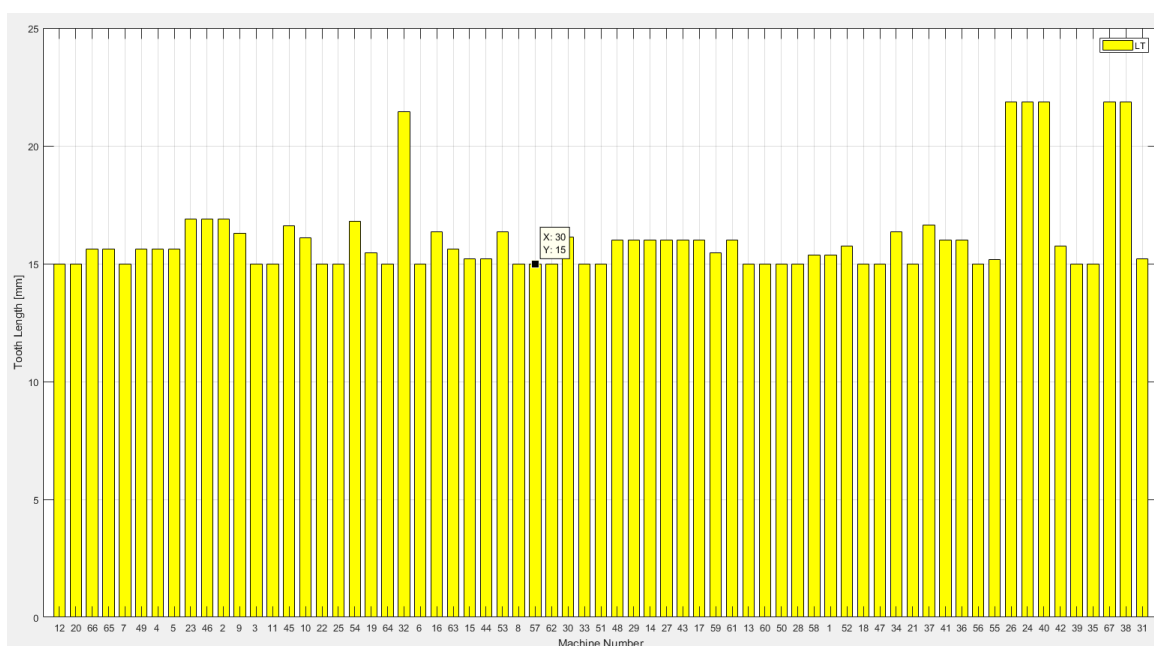


**Figura 3.5.** Gràfiques de les màquines resultants: valors de les HC (Font: Pròpia).

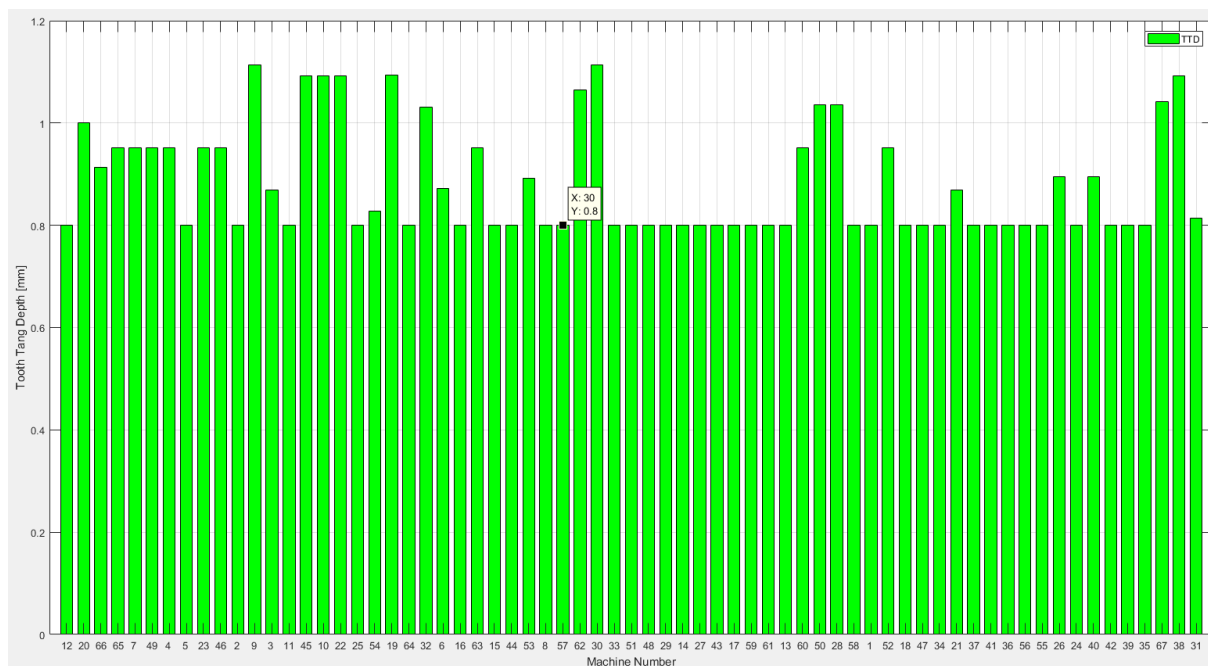
Resultats segons la geometria de l'estator:



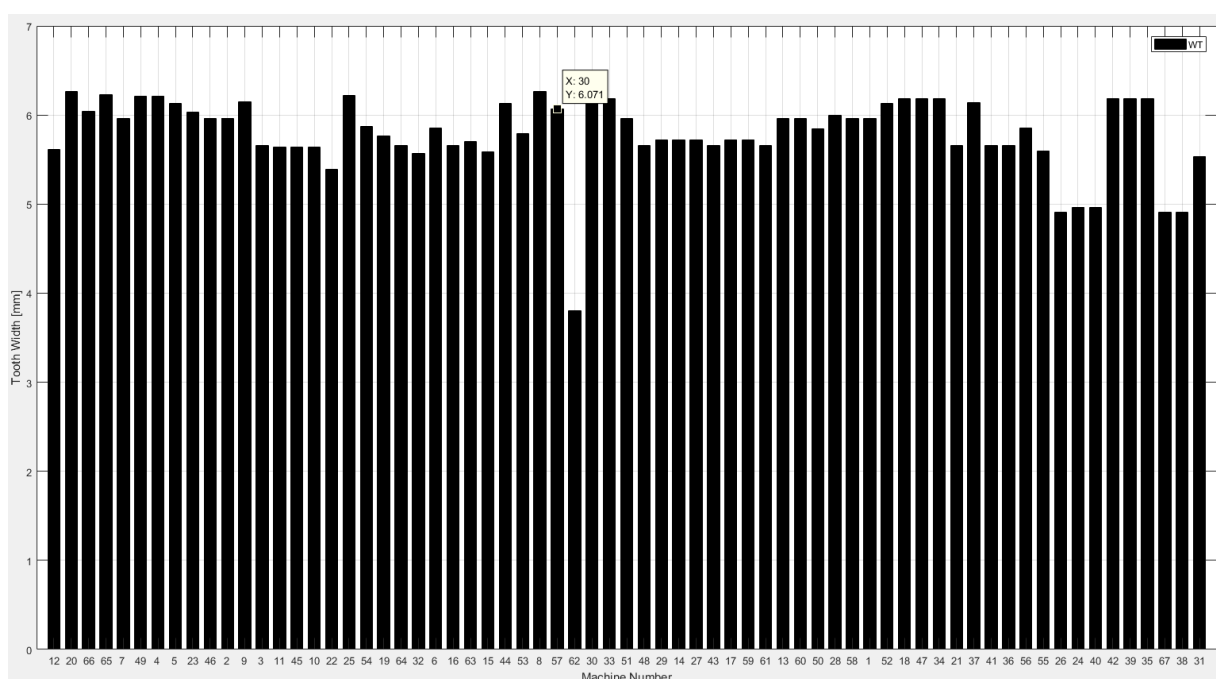
**Figura 3.6.** Gràfiques de les màquines resultants: valors de l'obertura de la ranura (Font: Pròpia).



**Figura 3.7.** Gràfiques de les màquines resultants: valors de la longitud de les dents (Font: Pròpia).



**Figura 3.8.** Gràfiques de les màquines resultants: valors d'altura de la punta de la dent (Font: Pròpia).



**Figura 3.9.** Gràfiques de les màquines resultants: valors de l'amplada de les dents (Font: Pròpia).

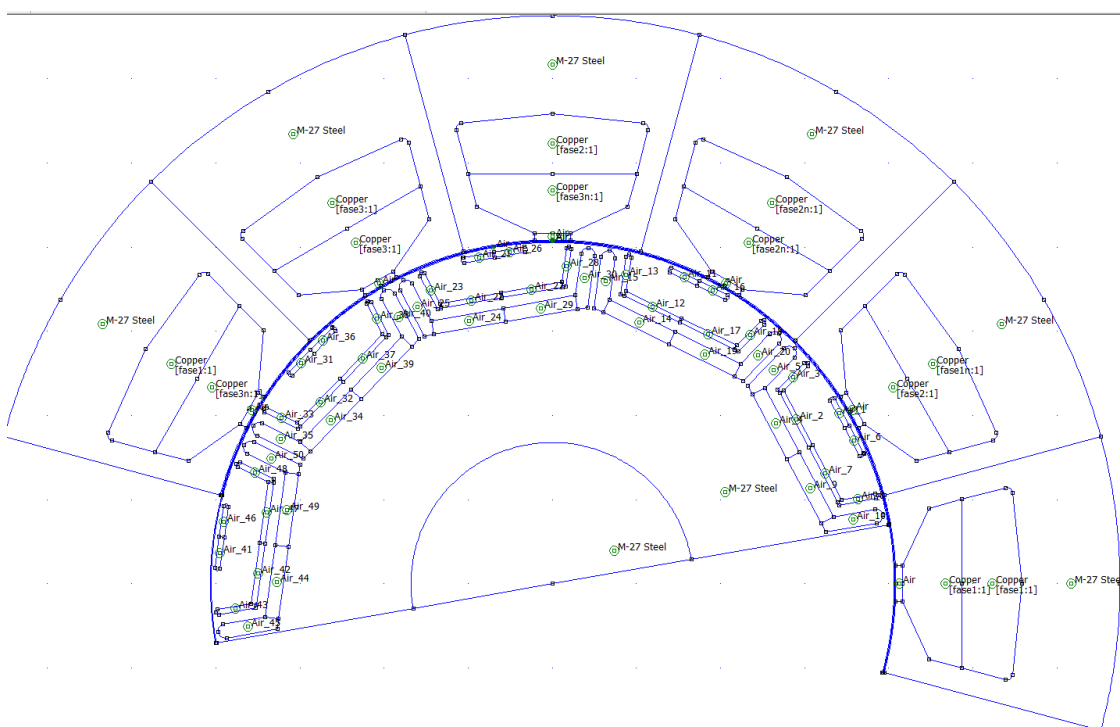
### 3.4. Elecció de la solució

El motor seleccionat ha sigut el número 57 de la sèrie, tal i com es pot veure al primer gràfic presenta una baixa rissada de parell i el parell generat pel motor és del mateix ordre que d'altres màquines amb una rissada molt més alta.

#### 3.4.1. Geometria i característiques del motor escollit

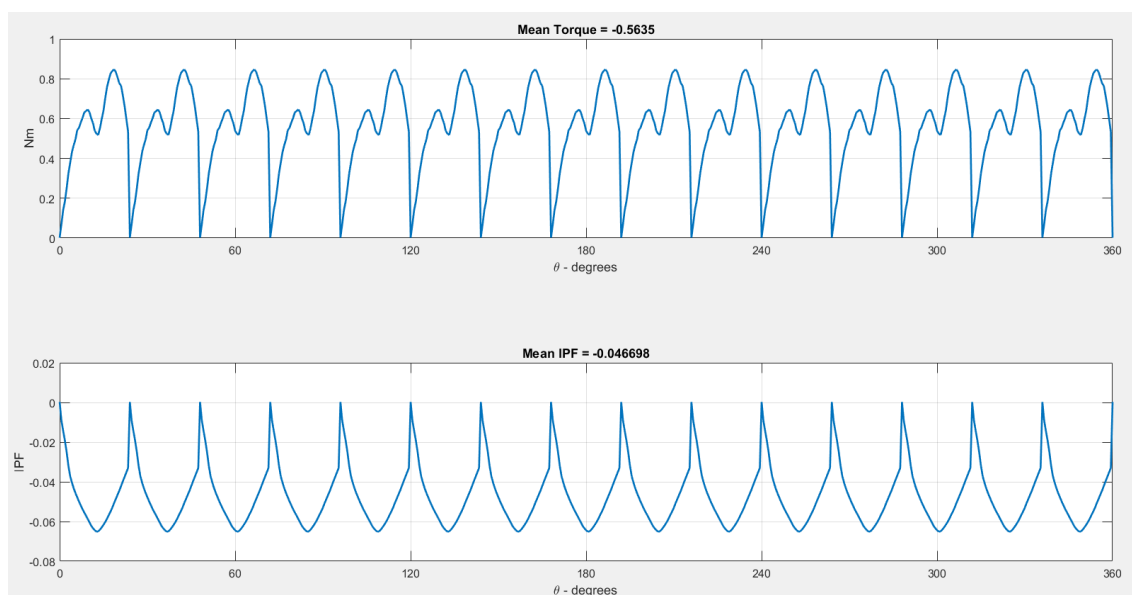
A continuació es presenta la geometria del motor escollit de la sèrie generada pel SyR-e:

Geometria del motor:

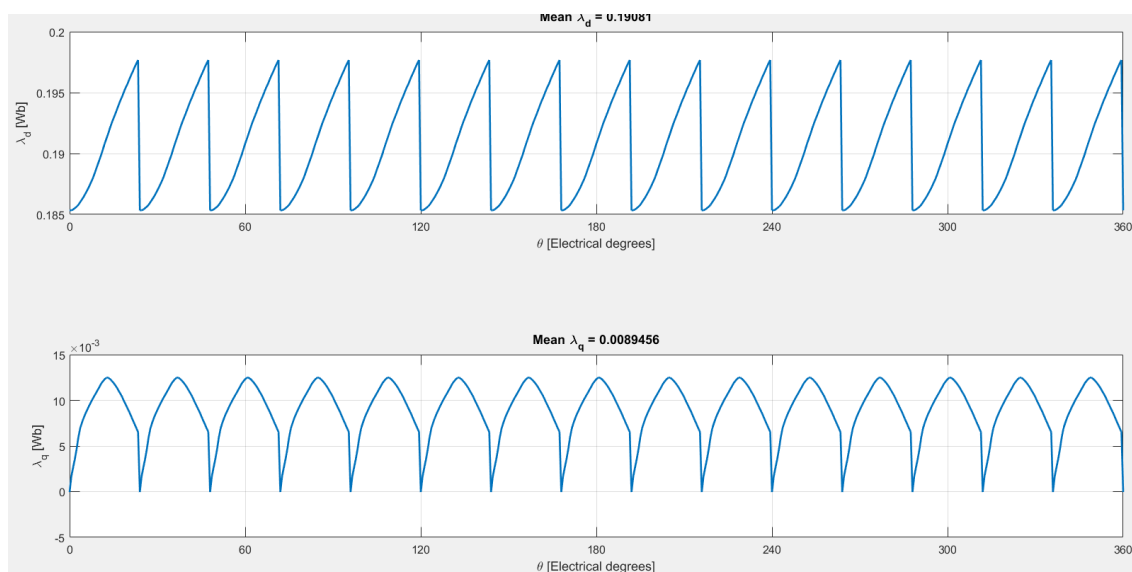


**Figura 3.10.** Captura de pantalla, fitxer .fem resultant de la màquina seleccionada (Font: Pròpia)

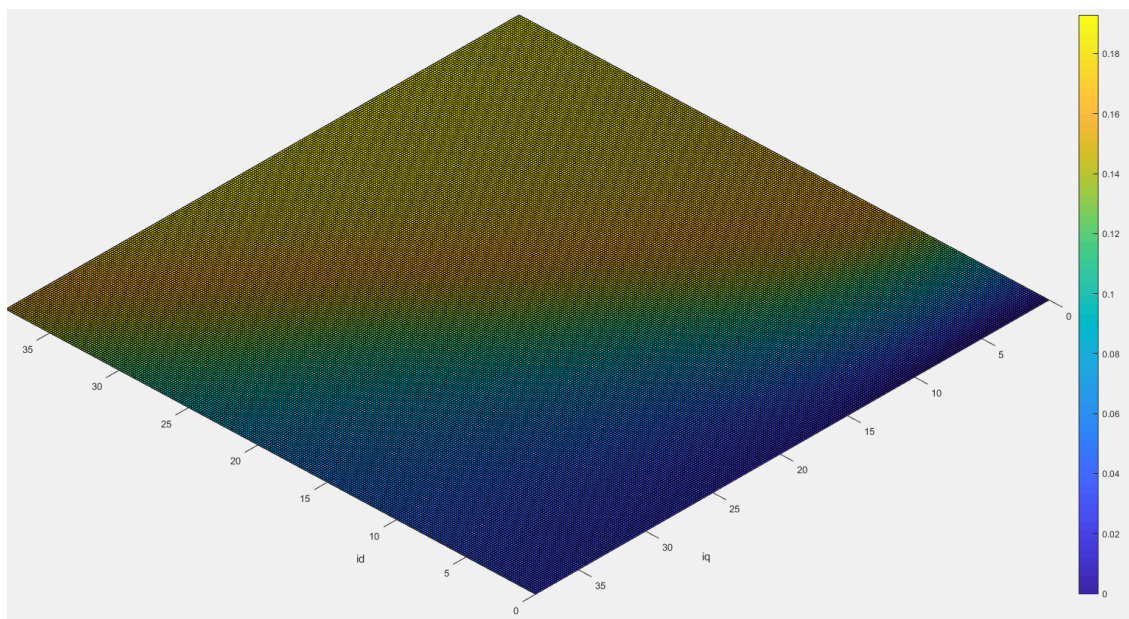
### Gràfiques característiques del motor:



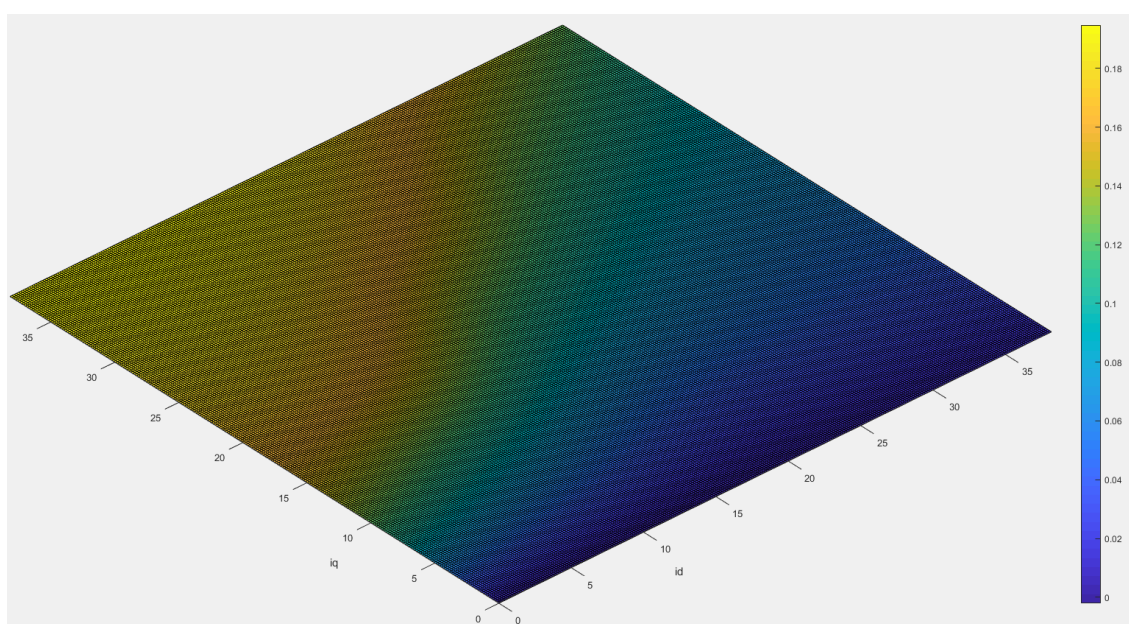
**Figura 3.11.** Gràfiques, parell i IPF de la màquina seleccionada (Font: Pròpia)



**Figura 3.12.** Gràfiques, Landa d i Landa q de la màquina seleccionada (Font: Pròpia)

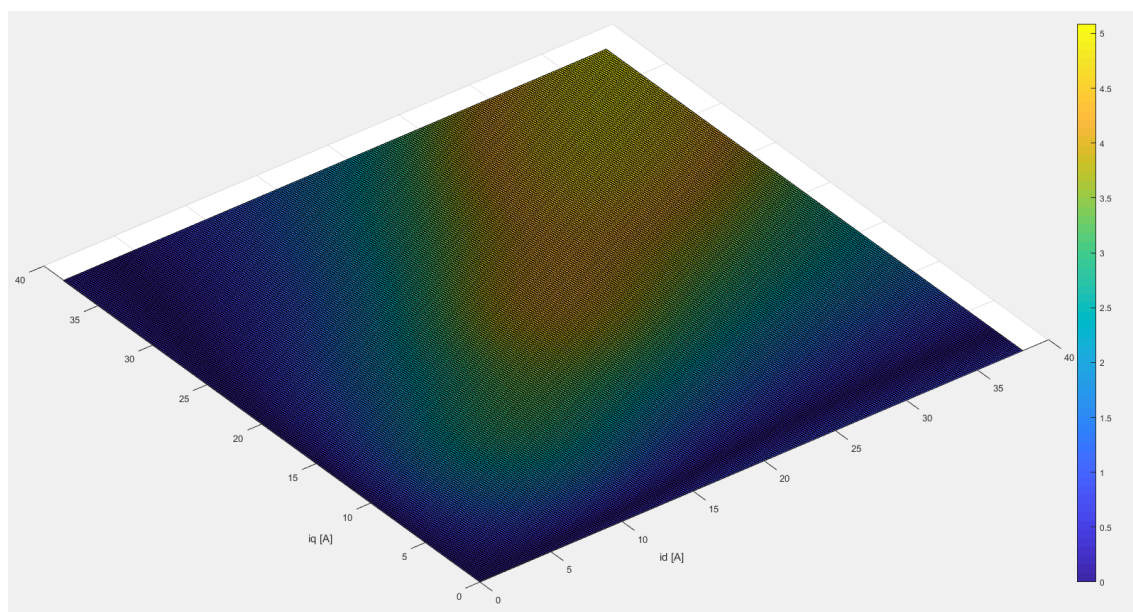


**Figura 3.13.** Gràfica, Flux Directe (Wb) (Barra de colors) en funció dels valors de les intensitats  $I_q$  i  $I_d$   
(Font: Pròpia)

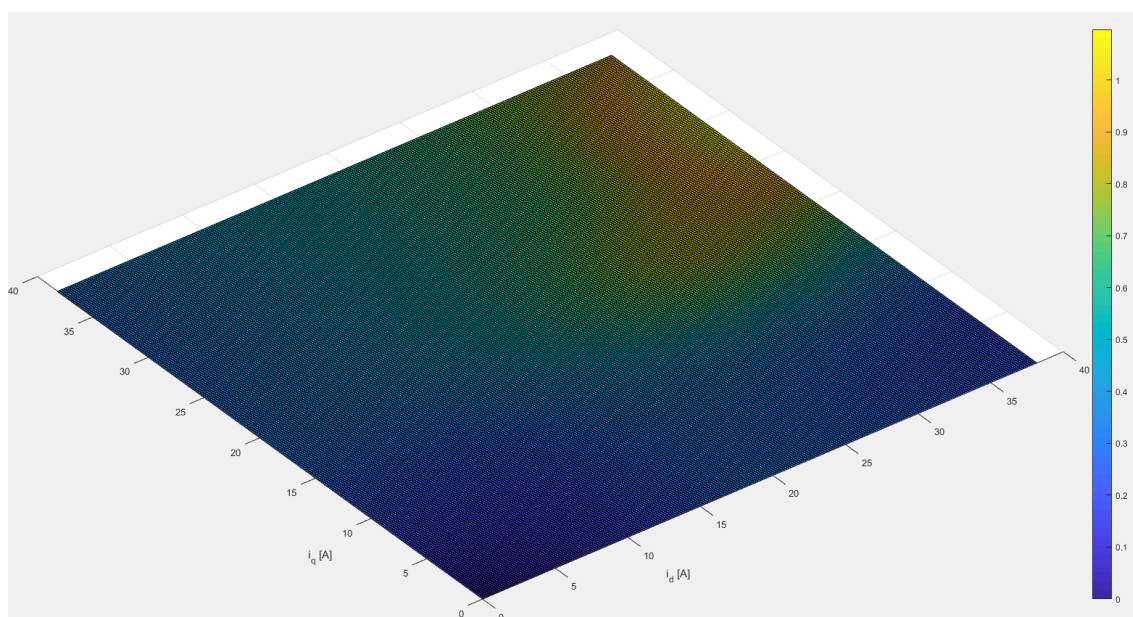


**Figura 3.14.** Gràfica, Flux en Quadratura (Wb) (Barra de colors) en funció dels valors de les intensitats  $I_q$  i  $I_d$   
(Font: Pròpia)

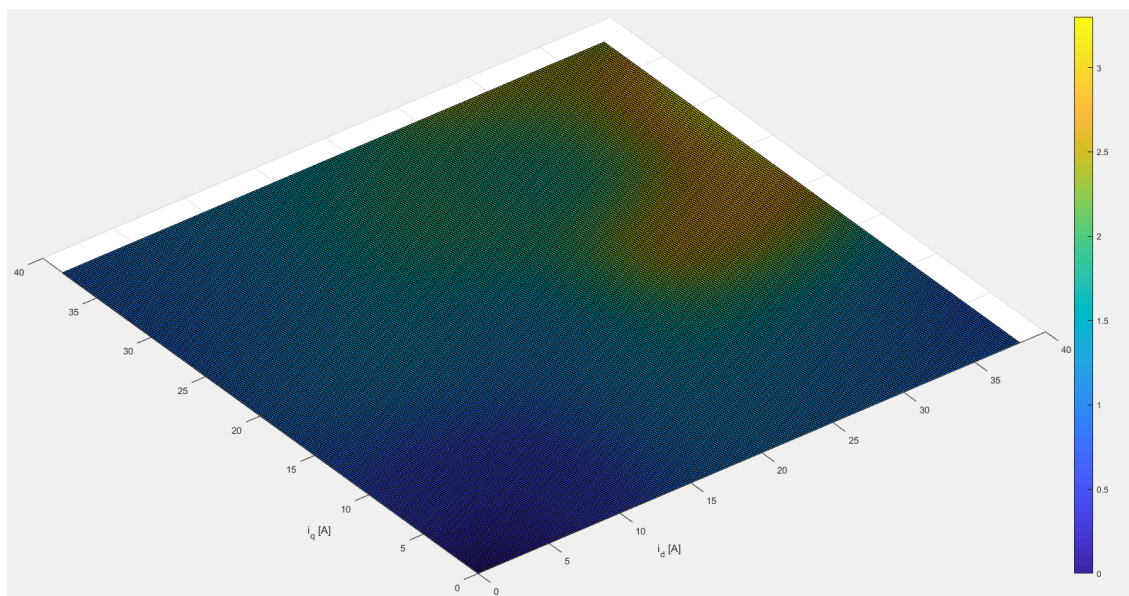




**Figura 3.15.** Gràfica, Parell (Barra de colors) (Nm) en funció dels valors de les intensitats  $i_q$  i  $i_d$  (Font: Pròpia)



**Figura 3.16.** Gràfica, Rissada del Parell (%) (Barra de colors) en funció dels valors de  $i_q$  i  $i_d$  (Font: Pròpia)



**Figura 3.17.** Gràfica, Rissada del Parell de pic a pic (Nm) (Barra de colors) en funció dels valors de  $i_q$  i  $i_d$   
(Font: Pròpia)



## 4. Anàlisi per Elements Finites del Motor Tipus

Un cop ja seleccionat un primer disseny inicial de la màquina, es desenvoluparà per tal de realitzar les simulacions i determinar que és una màquina vàlida per complir amb les necessitats demandades.

### 4.1. Anàlisi Magnètica

L'eina utilitzada per aquest apartat serà el FEMM, aquest programa Open Source permet realitzar anàlisis magnètiques, electrostàtiques, de flux de calor i de flux de corrent.

Aquest programa ofereix la possibilitat d'automatitzar processos mitjançant el llenguatge LUA.

#### 4.1.1. Importació de la geometria de la màquina

El primer pas per tal de començar a treballar serà la importació del dibuix de l'estator i el rotor obtingut amb l'eina SyR-e.

S'obrirà el fitxer resultant .fem generat per SyR-e i s'exportarà amb format .dxf

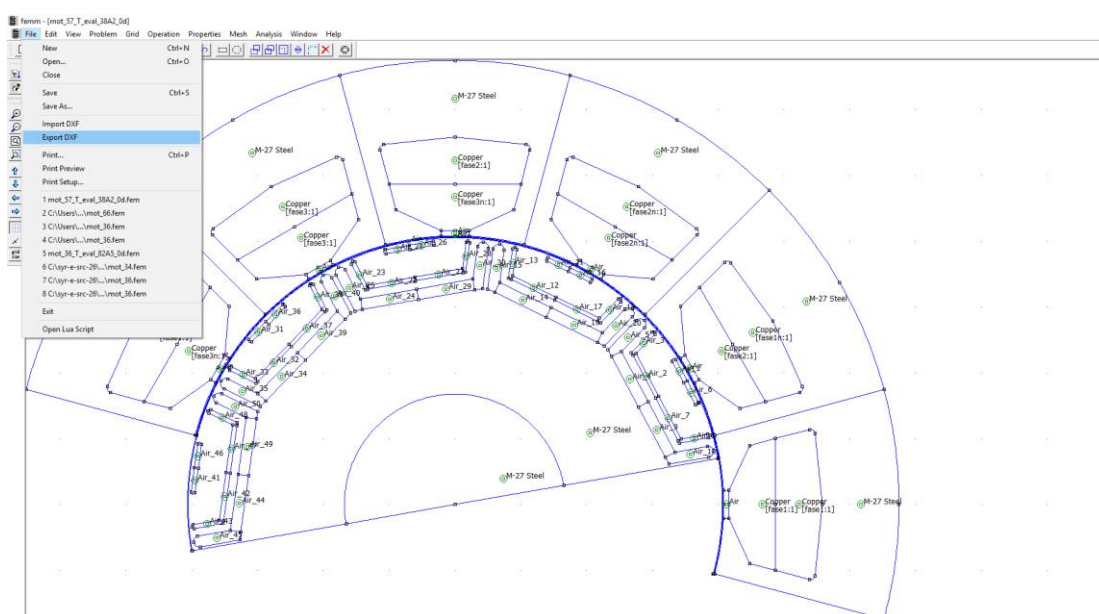
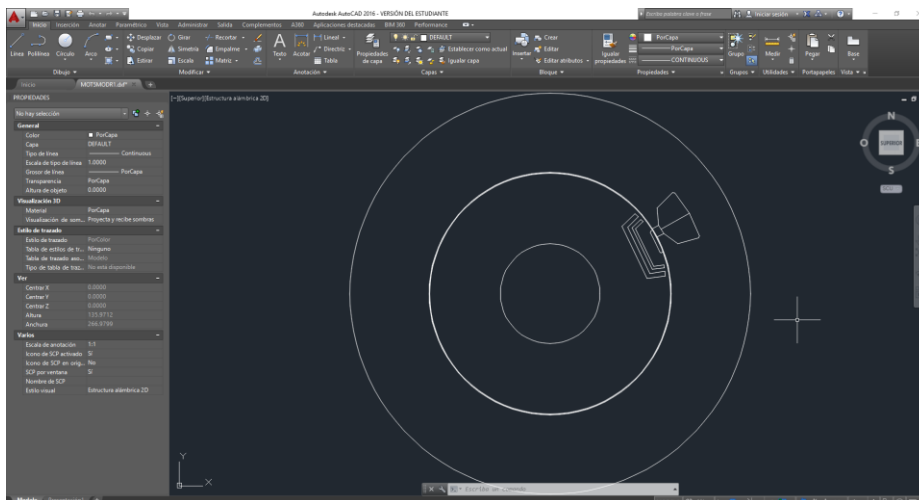


Figura 4.1. Captura de pantalla. Exportació a un fitxer .dxf (Font: Pròpia)

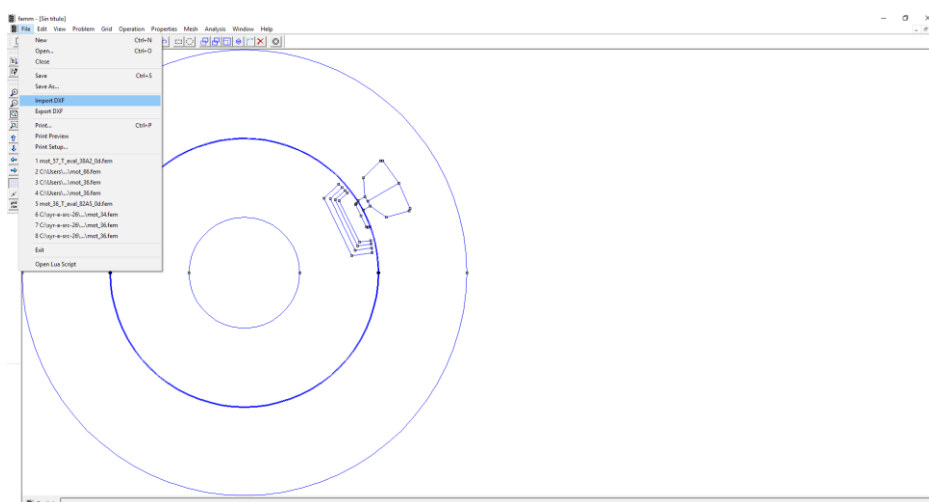
Un cop amb format .dxf s'utilitzarà el software de dibuix assistit per ordinador AutoCAD per tal de modificar-lo.

Aquestes modificacions consistiran en: adaptar els camins d'aire del rotor per tal de que siguin de com a mínim 1 mm, simplificar el màxim el nombre de vèrtex i punts pels que està compost el dibuix (això reduirà el temps de simulació) i finalment deixar només una ranura estatòrica i un pol rotòric.



**Figura 4.2.** Captura de pantalla. Modificació de la geometria amb CAD (Font: Pròpia)

El següent pas serà l'invers, importar el dibuix .dxf a el programa FEMM



**Figura 4.3.** Captura de pantalla. Importació del fitxer .dxf al FEMM (Font: Pròpia)

Un cop s'ha obtingut el motor simplificat, es copiaran els elements del motor per tal d'aconseguir 12 ranures estatòriques i un total de 10 pols al rotor.

Un cop ja es té dibuixat el motor amb la seva totalitat, es passaran a determinar el materials dels que estarà composta la màquina.

#### 4.1.2. Caracterització del problema

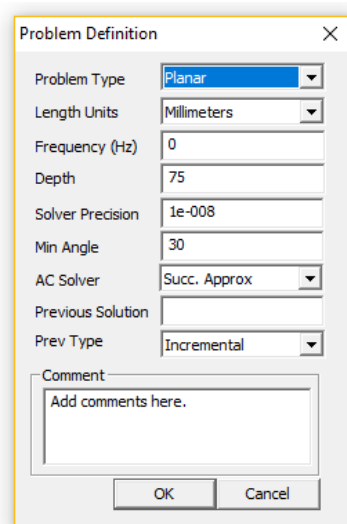
A continuació, es descriuen les característiques necessàries a introduir al programa per tal de poder simular la màquina.

##### 4.1.2.1. Definició del problema

Aquí es determinarà la freqüència amb què es fan les simulacions, la profunditat de la màquina i el sistema mètric a emprar.

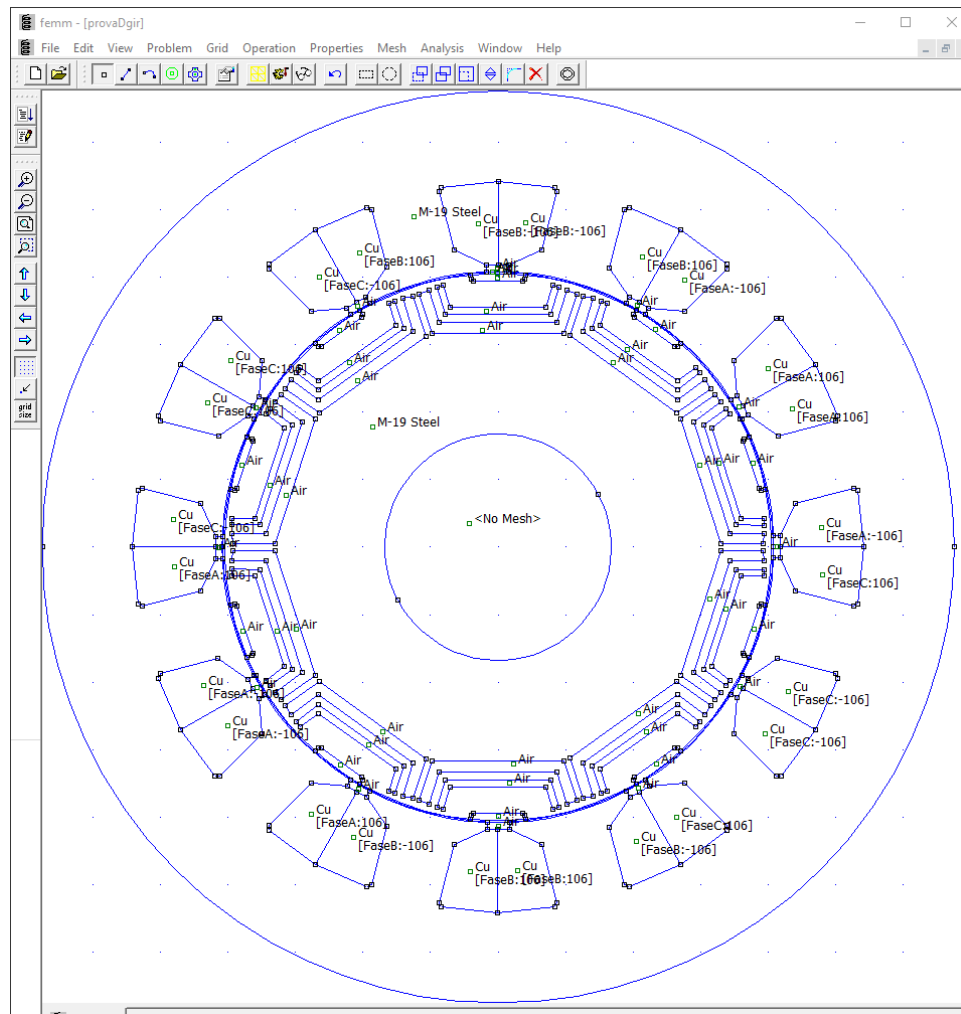
Pel que fa a la profunditat, s'agafarà el primer valor inicial donat a l'apartat **4.2.3.** i es realitzaran diferents simulacions per comprovar si és correcte.

**Nota:** Després de la comprovació, i veient que no dona el parell desitjat, s'elegeix un empilat de 75mm.



**Figura 4.4.** Captura de pantalla. Consola de la definició del problema (Font: Pròpia)

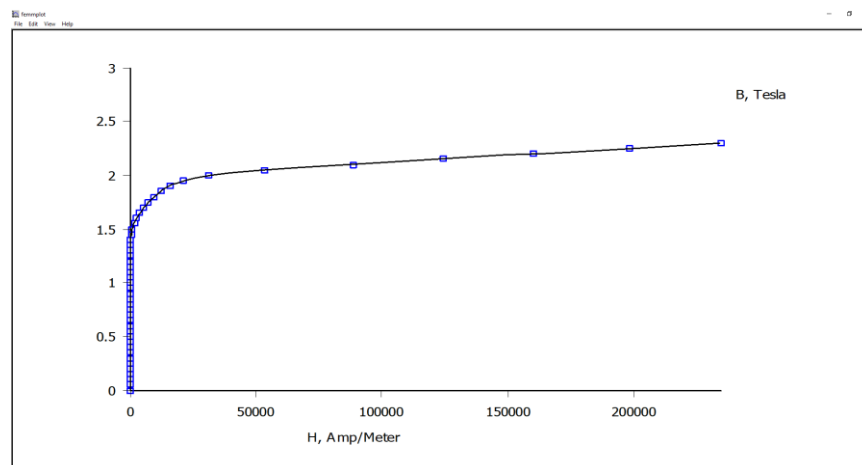
#### 4.1.2.2. Elecció de materials



**Figura 4.5.** Captura de pantalla. Distribució dels diferents materials a la màquina (Font: Pròpia).

La màquina bàsicament estarà composta de dos tipus de materials: la xapa magnètica i el coure del bobinat. Ambdós materials ja estan disponibles a la llibreria del FEMM.

La xapa magnètica escollida per aquest motor ha estat l'acer M-19 o bé M270-50a, les característiques magnètiques del qual són les següents:



**Figura 4.6.** Gràfica. Corba de saturació del ferro (M19) de la màquina (Font: Pròpia)

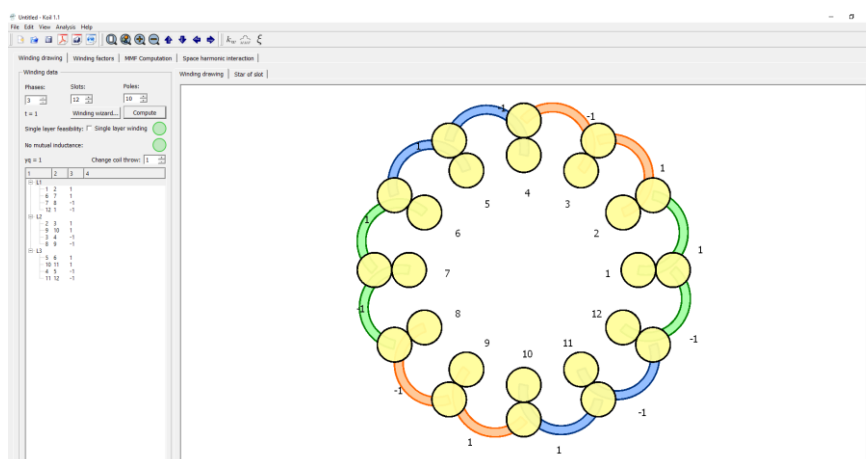
Aquest acer presenta unes característiques de saturació prou bones i permetrà tenir un marge.

El coure presentarà les característiques del fil de coure mètric de la llibreria i l'aire també serà el que proporciona el programa.

#### 4.1.2.3. Distribució del bobinat

Pel que fa a com estarà disposat el bobinat a les ranures estatòriques s'utilitzarà el programa Koil per tal de determinar-ho.

El motor presentarà un bobinat de doble capa (concentrat), distribuït en 12 ranures i de 10 pols.



**Figura 4.7.** Captura de pantalla. Resultat del disseny del bobinat del programa Koil (Font: Pròpia)

Un cop determinat el bobinat amb el programa s'introduirà al FEMM.

Pel que fa al nombre de conductors que formaran el bobinat es fa una primera aproximació a nivell de càlcul:

Nombre de ranures i factor de bobinat (extret de coil):

$$Q := 12 \quad k_w := 0.93 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Nombre de conductors (totals i per ranura):

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 2.09 \times 10^3 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 174.168 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$Z_{r_t} := 212 \quad Z_{t_t} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 2.032 \times 10^3 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

El nombre d'espises del bobinat definitiu es determinarà fent diferents proves i observant la saturació a diferents punts característics de la màquina i el parell resultant. Al cas present s'ha determinat una bobinat de **106 espises per fase**, fet que representarà **212 espises per ranura**.

La secció dels conductors serà resultat de les següents expressions:

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

On:

aa és el nombre de conductors en paral·lel, en aquest cas: 1

$\Delta$  és la densitat de corrent, en aquest cas: 6 A/m

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.437 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 0.746 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 4.6}) \text{ i } (\text{Eq. 4.7})$$

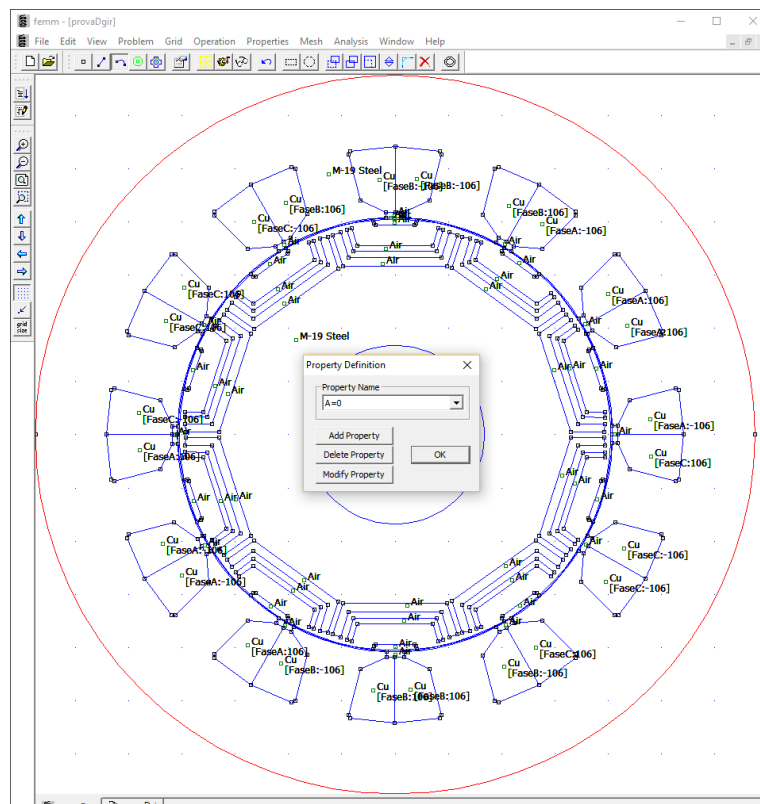
Així doncs, s'escull un conductor de **0,75 mm** de diàmetre.

L'últim pas serà comprovar que els conductors caben a la ranura de l'estator i determinar el factor d'ocupació – que resultarà de 0,4 , per tant, un valor acceptable, ja que és el valor límit.

Per a més informació sobre els càlculs, consulteu l'Annex.

#### 4.1.2.4. Condicions de contorn

S'hauran de determinar uns límits per tal de fer la simulació: aquesta frontera s'assignarà a les línies del contorn exterior de l'estator, assignant unes condicions de  $A=0$



**Figura 4.8.** Captura de pantalla. Definició de les condicions de contorn al FEMM (Font: Pròpia).



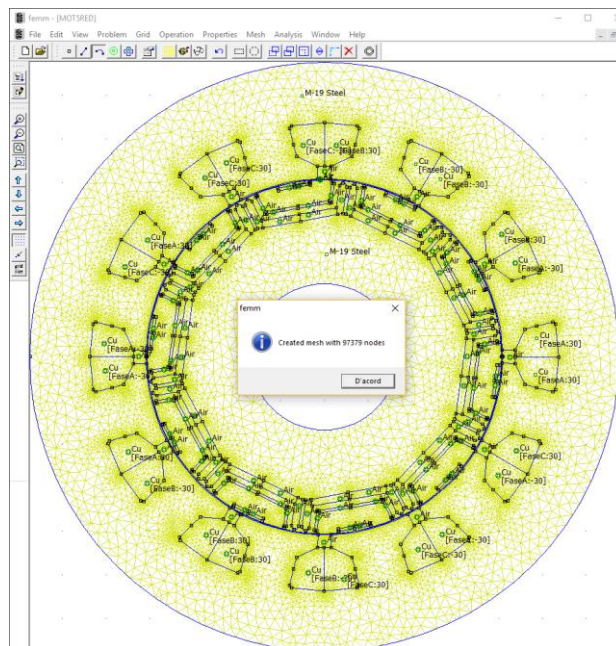
#### 4.1.2.5. Definició dels circuits

Es crearan tres circuits, un per fase, seleccionant la pestanya *properties-> circuits -> Add property*.

A la fase A se li assignaran  $2.62 \cdot \sqrt{2}$  A. Mentre que a les altres dues fases se'ls hi assignarà la meitat d'aquest valor multiplicat per -1.

#### 4.1.2.6. Creació de la malla

Finalment, i per comprovar que totes les propietats de les diferents zones estan correctament definides, es crearà una malla.



**Figura 4.9.** Captura de pantalla. Mallat de les diferents regions de la màquina. (Font: Pròpia)

#### 4.1.3. Determinació del punt de parell màxim

Serà necessari determinar quina és la posició del rotor on es troba el parell màxim: així doncs, es llançarà una primera simulació que consistirà en fer girar el rotor grau a grau i trobar el punt on el parell és més gran.

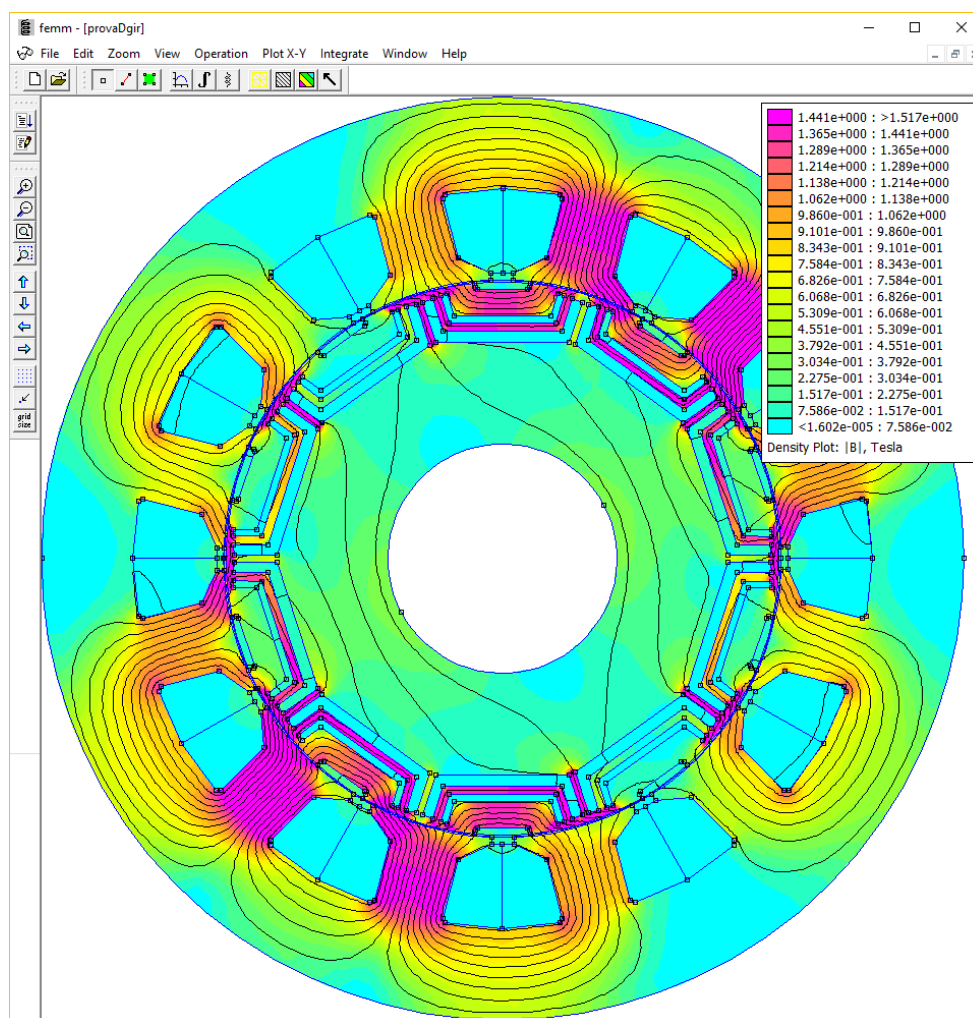
S'implementa un codi LUA (vegeu l'Annex) i s'obté un fitxer .txt amb el parell punt a punt, aquest fitxer indica que el punt on s'obté aquest parell és a 28°.

Finalment fem girar el rotor aquests 28 graus per tal de situar-lo al punt on es dona aquest parell.

#### 4.1.4. Saturació de la màquina i parell resultant

Aquí es donaran les característiques de saturació de la xapa magnètica en diferents punts significatius de la mateixa.

Un cop llançada la simulació el resultat obtingut és el següent:



**Figura 4.10.** Captura de pantalla. Inducció magnètica als diferents punts de la màquina. (Font: Pròpia)

	Inducció Màxima (T)
Entreferro	1
Corona estatòrica	0,85
Dent estator	1,6
Corona rotòrica	1,8

**Taula 4.1.** Valors de la inducció en diferents punts de la màquina.

El parell obtingut amb aquesta posició del rotor es determina realitzant la integral de bloc de rotor, concretament amb l'opció *Torque via Weighted Stress Tensor*, el resultat és de **2,78 Nm**

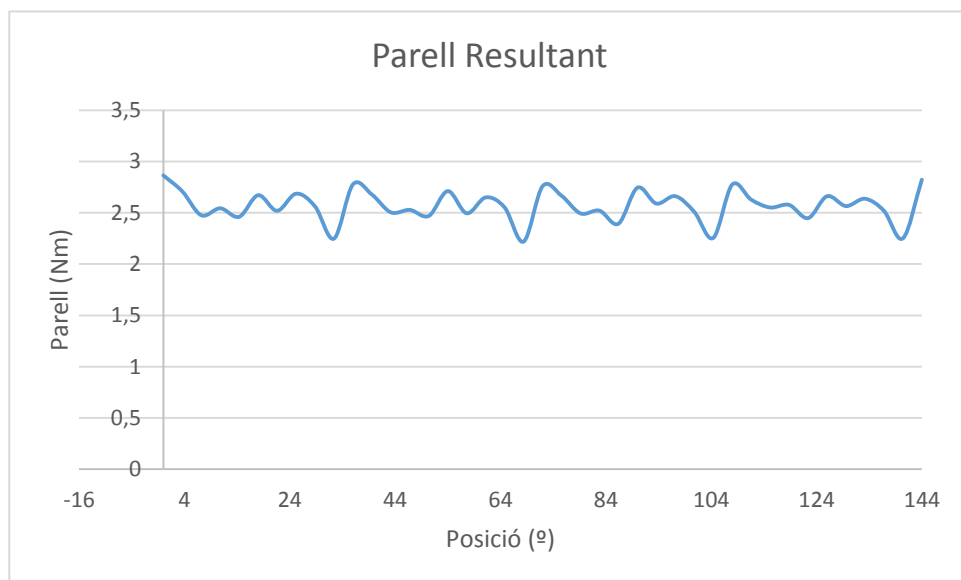
#### 4.1.5. Parell girant

En aquest apartat es mostraran els resultats del parell girant de la màquina, aquesta estarà alimentada sinusoïdalment, o sigui que durant el seu funcionament la intensitat de cada fase anirà variant amb una forma d'ona sinusoïdal en funció del temps, també al mateix moment anirà girant el rotor del motor. S'implementa un codi LUA (vegeu l'Annex) i s'obté un fitxer de text pla.

Un cop obtingut el fitxer .txt amb el resultats es processaran amb un full de càlcul Excel i s'obtindrà, les següents gràfiques:

#### 4.1.5.1. Gràfics Parell Girant

Parell en funció de la posició:

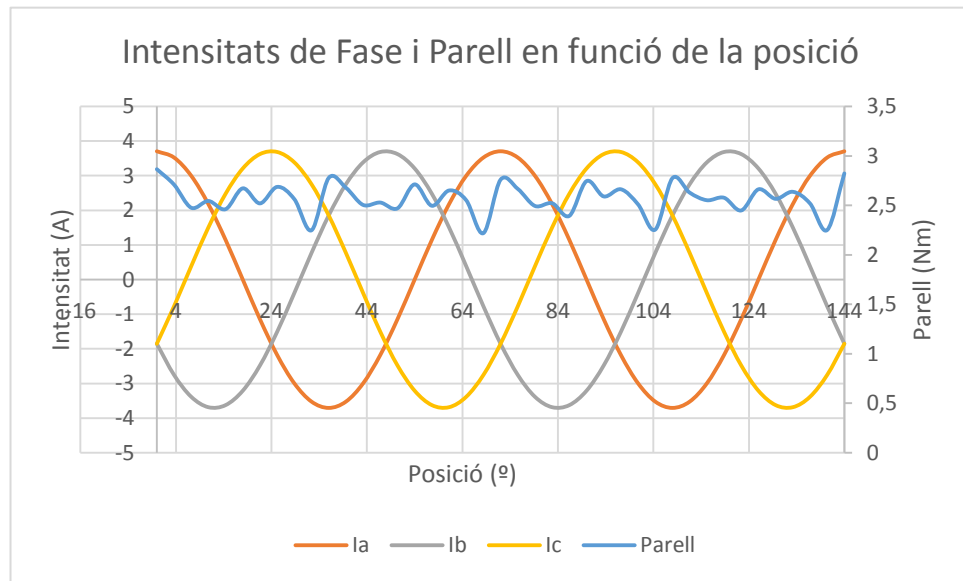


**Figura 4.11.** Gràfic del parell resultant del motor en funció de la posició del rotor. (Font: Pròpia)

	Parell (Nm)			
<b>AVG</b>	2,57		<b>Pic a Pic</b>	<b>Mig a Pic</b>
<b>MAX</b>	2,87	<b>Rissada (%)</b>	25,13	12,57
<b>MIN</b>	2,22			

**Taula 4.2.** Valors del parell resultant de la màquina i la seva rissada

Intensitats de Fase i Parell en funció de la posició.



**Figura 4.12.** Gràfic del parell resultant del motor i les intensitats de fase en funció de la posició. (Font: Pròpia)

#### 4.1.6. Pèrdues

Es determinaran les pèrdues del motor, que bàsicament són de dos tipus: pèrdues Joule, que es generen al bobinat de la màquina; i pèrdues del ferro, que es produeixen als empilats de xapa tant del rotor com de l'estator.

Les pèrdues del ferro no es poden extreure directament del programa i per tant serà necessari una expressió pel càlcul de les pèrdues del ferro, vindrà determinada per l'expressió de Bertotti:

$$P_{Fe} := P_h + P_{fouc} + P_{ad} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$(\text{Eq. 4.9})$$

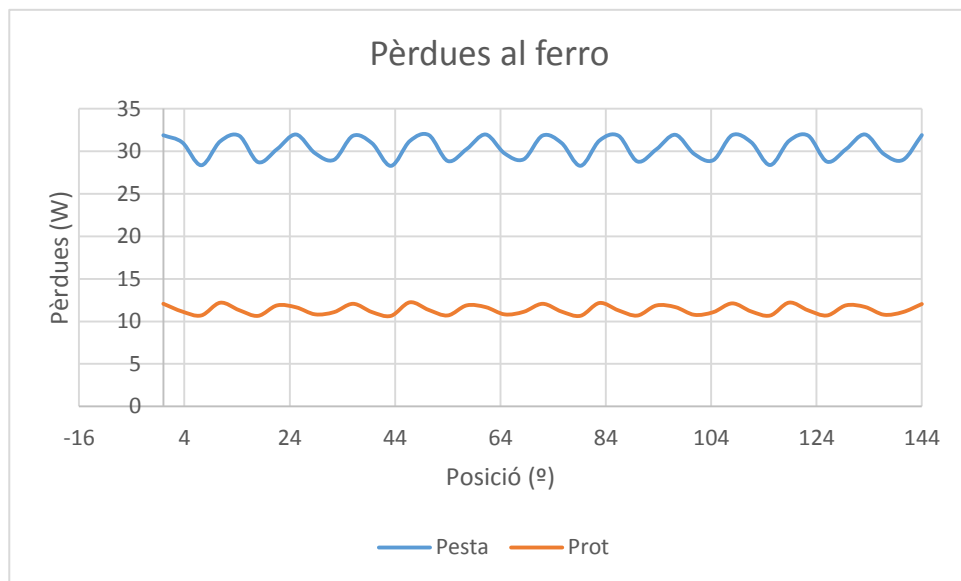
$$dP_{Fe} := k_{hist} \cdot f \cdot B^2 + k_e \cdot \frac{\pi \cdot \sigma \cdot d^2}{6} \cdot \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 + k_{ad} \cdot \left( \frac{dB}{dt} \right)^{\frac{3}{2}}$$

On caldrà determinar els 3 coeficients k ja que tots els altres valors són coneguts.

**Nota:** Els coeficients de Bertotti es determinaran a partir d'una aproximació lineal (vegeu l'Annex de Càlcul de Pèrdues)

Finalment, les pèrdues Joule les determina directament el programa d'elements finits, mitjançant l'execució del corresponent codi LUA.

#### 4.1.6.1. Gràfics Pèrdues al ferro



**Figura 4.13.** Gràfic de les pèrdues magnètiques al ferro en funció de la posició del rotor. (Font: Pròpia)

	Pesta (W)	Prot (W)
AVG	30,43	11,37
MAX	31,98	12,24
MIN	28,28	10,65

**Taula 4.3.** Valors de les pèrdues al Ferro de la màquina

#### 4.1.6.2. Pèrdues Joule

Les pèrdues d'aquest tipus es determinaran fàcilment a partir del fitxer .ans, seleccionant totes les ranures estatòriques i aplicant la integral de bloc *Resistive losses*.

El resultat obtingut és de **48,79 W**

## 4.2. Anàlisi Tèrmica amb Elements Finitis

Per tal de determinar la viabilitat del disseny de la màquina serà necessària una anàlisi de l'escalfament, que es realitzarà amb el mateix programa que l'anàlisi tèrmica del FEMM, amb el mode *Heat Flow Problem*.

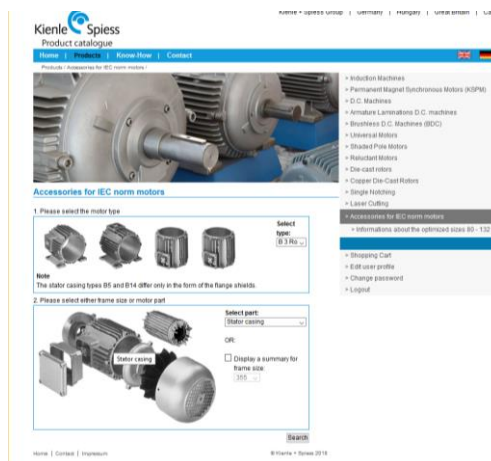
El resultat d'aquestes simulacions indicaran la idoneïtat dels aïllaments elèctrics escollits per al motor i així com l'elecció de solucions per tenir unes temperatures de funcionament adequades.

### 4.2.1. Determinació de la geometria del motor

#### Selecció de la carcassa

Primerament, per les característiques constructives del motor predissenyat es considera convenient dotar-lo d'una carcassa externa, aquesta facilitarà la refrigeració de la màquina, l'acoblament d'aquesta a la càrrega i un assemblatge més compacte.

El fabricant de motors i parts de motors *Kienle Spiess* té disponible un catàleg online on es podrà trobar la millor solució pel motor objecte.

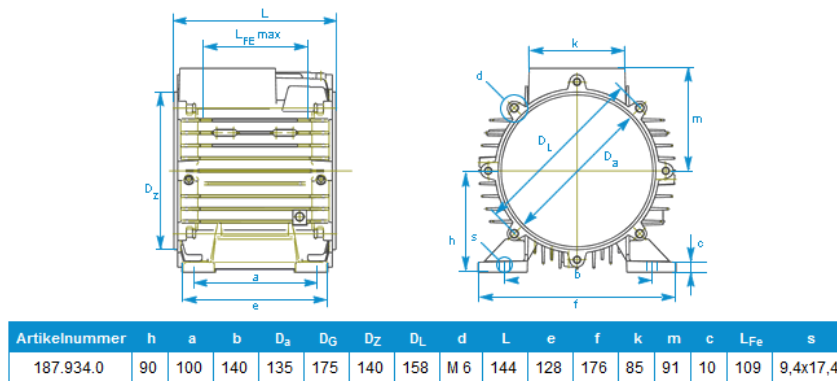


**Figura 4.14.** Captura de pantalla del catàleg de carcasses de Kienle Spiess. (Font: <http://www.kienle-spiess.de>)

Es selecciona un tipus de motor B3, de muntatge horitzontal amb els suports a la part de baix i la caixa de connexions a la part superior.

Dins del catàleg disponible a la web es selecciona una carcassa IEC (normalitzada) per un motor amb diàmetre estatòric exterior de 135 mm, el tipus 90S (vegeu documentació adjunta)

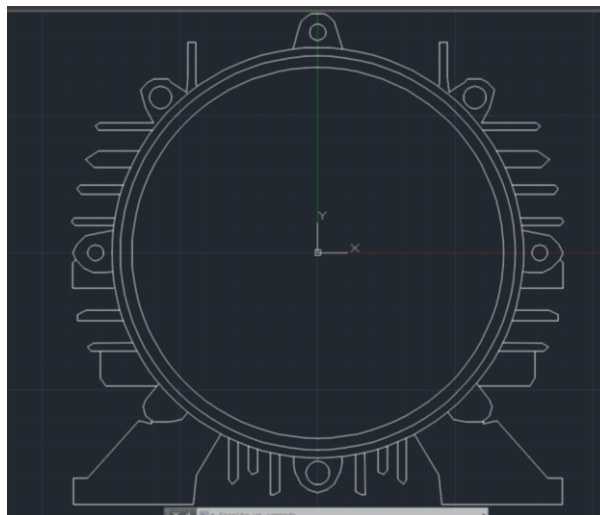
#### Stator empty casing dimensions



**Figura 4.15.** Captura de pantalla de la carcassa seleccionada de KIENTLE SPIESS.

(Font: <http://www.kientle-spiess.de>)

Un cop ja seleccionada amb l'eina Autocad es dibuixarà una carcassa del mateix tipus i de dimensions similars.



**Figura 4.16.** Captura de pantalla del dibuix de la carcassa en CAD. (Font: Pròpia)



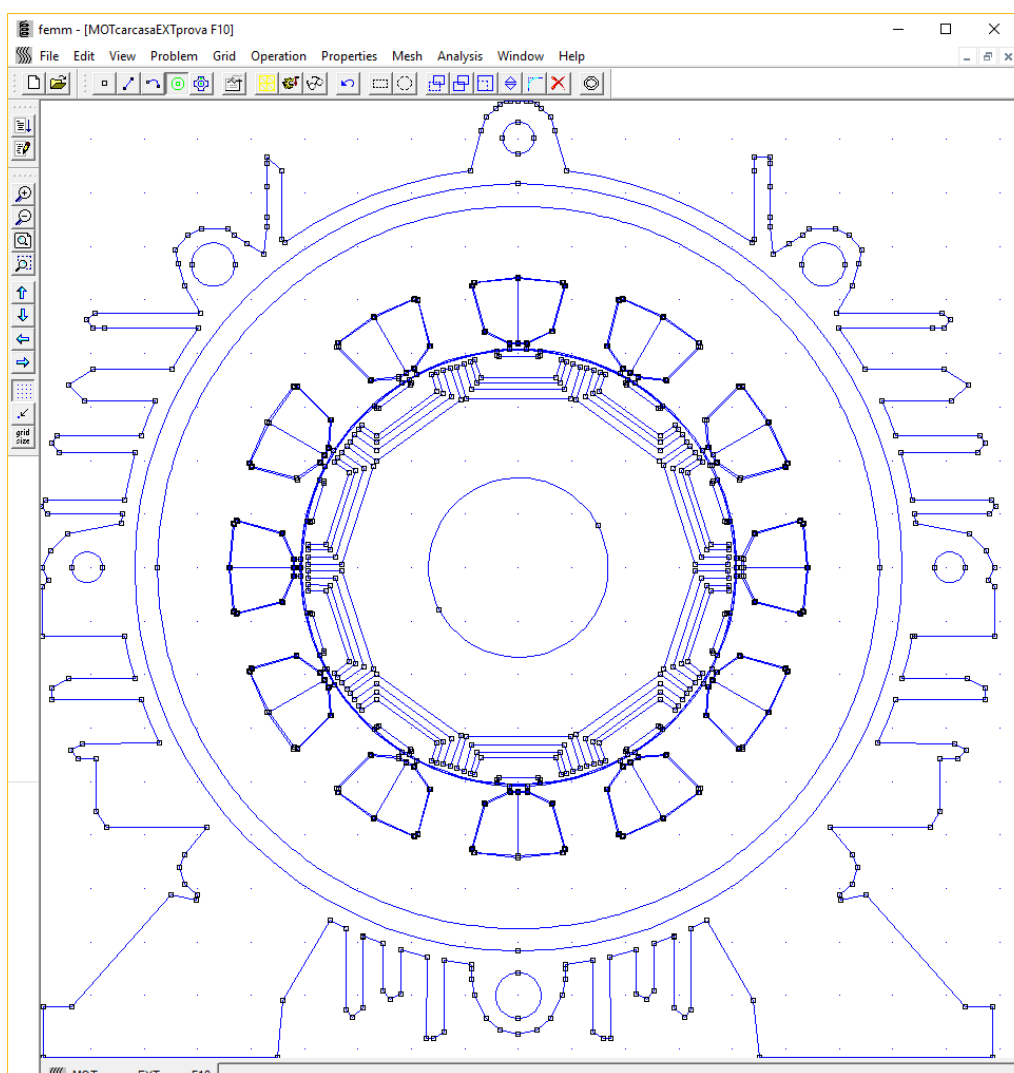
## Importació de la geometria de la màquina

Es guardarà l'arxiu en format .dxf i s'importarà al FEMM

S'editarà convenientment el dibuix per tal d'eliminar vèrtex i línies innecessàries.

Un cop ja es té la carcassa amb l'Autocad s'editarà la geometria de la xapa per afegir-hi una capa d'aïllament (0,25 mm de gruix) dins de les ranures estatòriques.

A continuació es procedeix a importar el dibuix .dxf al programa d'elements finits.

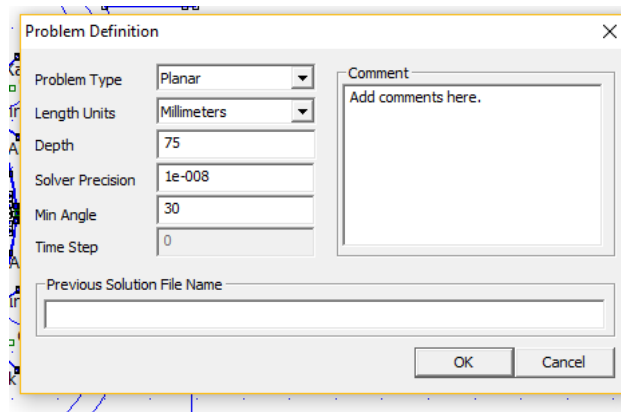


**Figura 4.17.** Captura de pantalla de la carcassa importada al FEMM. (Font: Pròpia)

## 4.2.2. Caracterització del problema

### 4.2.2.1. Definició del problema

Aquí es determinarà la profunditat de la màquina, la precisió de les simulacions i el sistema mètric a utilitzar.



**Figura 4.18.** Captura de la consola de definició de característiques de FEMM. (Font: Pròpia)

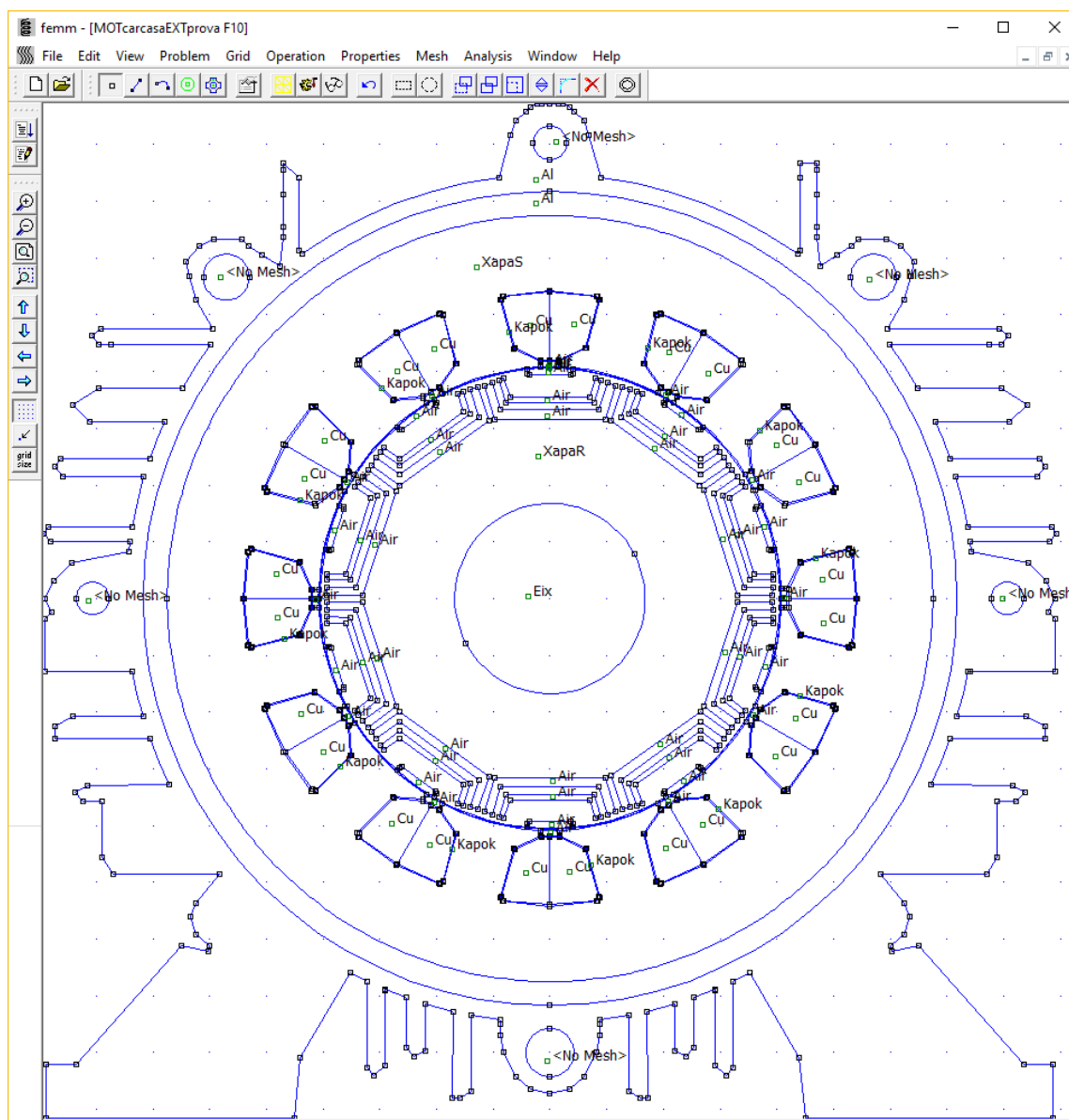
### 4.2.2.2. Elecció de materials

Igualment al realitzat a l'apartat tèrmic, per tal de tirar endavant la simulació serà necessària l'assignació d'un material a les diferents zones que conformen el motor.

Les característiques dels materials seran les assignades a la llibreria existent al mateix programa, així els materials que conformaran la màquina són els següents:

- Coure (material del qual està compost el bobinat de la màquina).
- Empilat de xapa magnètica (tant el rotor com l'estator estan compostos d'aquest material).
- Acer inoxidable (l'eix de la màquina serà una barra massissa d'aquest material).
- Alumini (la carcassa es considera composta d'aquest material, ja que està formada per un aliatge que té unes característiques tèrmiques similars).
- Aire (en els espais buits de l'interior de la màquina s'hi trobarà aire).
- Kapok (és el material del qual es conformarà l'aïllament entre el bobinat i el ferro de la ranura estatòrica).

A continuació es mostra com queden repartits els materials en funció del lloc de la geometria del motor on es troben:



**Figura 4.19.** Captura de pantalla del repartiment dels materials a la superfície de la màquina (Font: Pròpia)

#### 4.2.2.3. Determinació de la calor produïda segons les pèrdues.

Serà necessari conèixer la calor generada per cada material dels que esta composta la màquina, aquest valor de calor generada dependrà directament de les pèrdues produïdes dins de la màquina elèctrica.

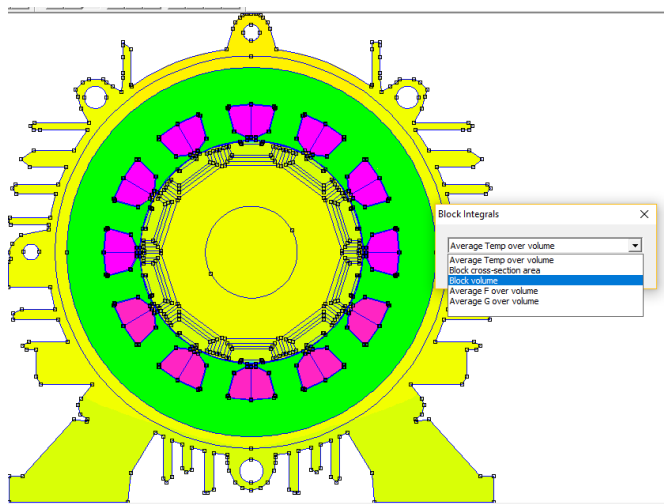
Principalment el motor tindrà dos tipus de pèrdues: les per efecte Joule i les produïdes al ferro. Així doncs amb les següents formules presentades es determinarà la calor generada per cada material en funció del seu volum (Volume Heat Generation), aquest paràmetre s'haurà de incloure a les característiques de cada material.

$$VHG_{Cu} = \frac{P_{Cu}}{V_{Cu}} \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$VHG_{FeR} = \frac{P_{FeR}}{V_{FeR}} \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$VHG_{FeS} = \frac{P_{FeS}}{V_{FeS}} \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Els valors de les pèrdues ja es tenen de l'apartat de simulacions magnètiques, metre que els volums es poden determinar fàcilment seleccionant, l'opció *Block volume* del fitxer .anh generat amb el FEMM.



**Figura 4.20.** Captura de pantalla de la determinació del volum de cada bloc (Font: Pròpia)

Així doncs aquests valors seran:

$$VHG_{Cu} = \frac{P_{Cu}}{V_{Cu}} = \frac{48,78}{1,15 \times 10^{-4}} = 322732,17 \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

$$VHG_{FeR} = \frac{P_{FeR}}{V_{FeR}} = \frac{11,37}{2,62 \times 10^{-4}} = 57941,78 \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

$$VHG_{FeS} = \frac{P_{FeS}}{V_{FeS}} = \frac{30,43}{5,25 \times 10^{-4}} = 43399,19 \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

Un cop es tenen s'introdueixen a la característica de cada material.

#### 4.2.2.4. Determinació dels coeficients de convecció

La manera que evacua la calor una màquina elèctrica és principalment la convecció a través de la carcassa, de l'entreferro i dels espais d'aire del rotor.

Amb el programa d'elements finits es pot simular aquest fenomen, però és necessari prèviament establir uns contorns de convecció i assignar-los un valor  $h$  (coeficient de convecció).

En la present màquina s'aplicaran bàsicament dos supòsits principals, un primer de ventilació natural de la màquina (sense ventilador) i un de ventilació forçada (tenint en compte un ventilador).

#### COEFICIENT AMB VENTILACIÓ NATURAL:

Aquest ve determinat bàsicament per la següent expressió:

$$h = 1,32 * \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D}} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (\text{Eq. 4.13})$$

On:

$\Delta T$ : és la diferència de temperatura entre el punt extern més calent i la temperatura ambient (70 °)

D: és el diàmetre exterior de de la zona on es produeix

Per la present màquina es tenen els següents coeficients:

Zona	Coefficient( $\frac{W}{m^2 K}$ )
Carcassa	5,79
Entreferro	7,16

**Taula 4.4.** Valors dels coeficients de convecció en els diferents punts del motor

### COEFICIENTS AMB VENTILACIÓ FORÇADA

En cas de no resultar suficient la convecció natural s'haurà d'instal·lar un ventilador al cul de la màquina per tal de crear un corrent que recorrerà aquesta augmentant-ne la refrigeració.

Els ventilador de la màquina pot generar un flux d'aire amb un rang de velocitats d'entre 5 i 15 m/s

En aquest cas el coeficient de convecció ve donat per:

$$h = 3,89 * \sqrt[2]{\frac{v}{L}} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (\text{Eq. 4.14})$$

On:

$v$ : és la velocitat de l'aire

$L$ : és la longitud de la zona on es produeix la convecció

Com que es poden donar diversos supòsits de velocitat de l'aire s'establiran el valors de convecció en 3 casos: 6, 10 i 15 m/s.

Els valors que prenen els coeficients són:

	<b>Zona</b>	<b>Coeficient(<math>\frac{W}{m^2K}</math>)</b>
<b>6 m/s</b>	<b>Carcassa</b>	25,11
	<b>Entreferro</b>	34,79
<b>10 m/s</b>	<b>Carcassa</b>	32,42
	<b>Entreferro</b>	44,92
<b>15 m/s</b>	<b>Carcassa</b>	39,70
	<b>Entreferro</b>	55,01

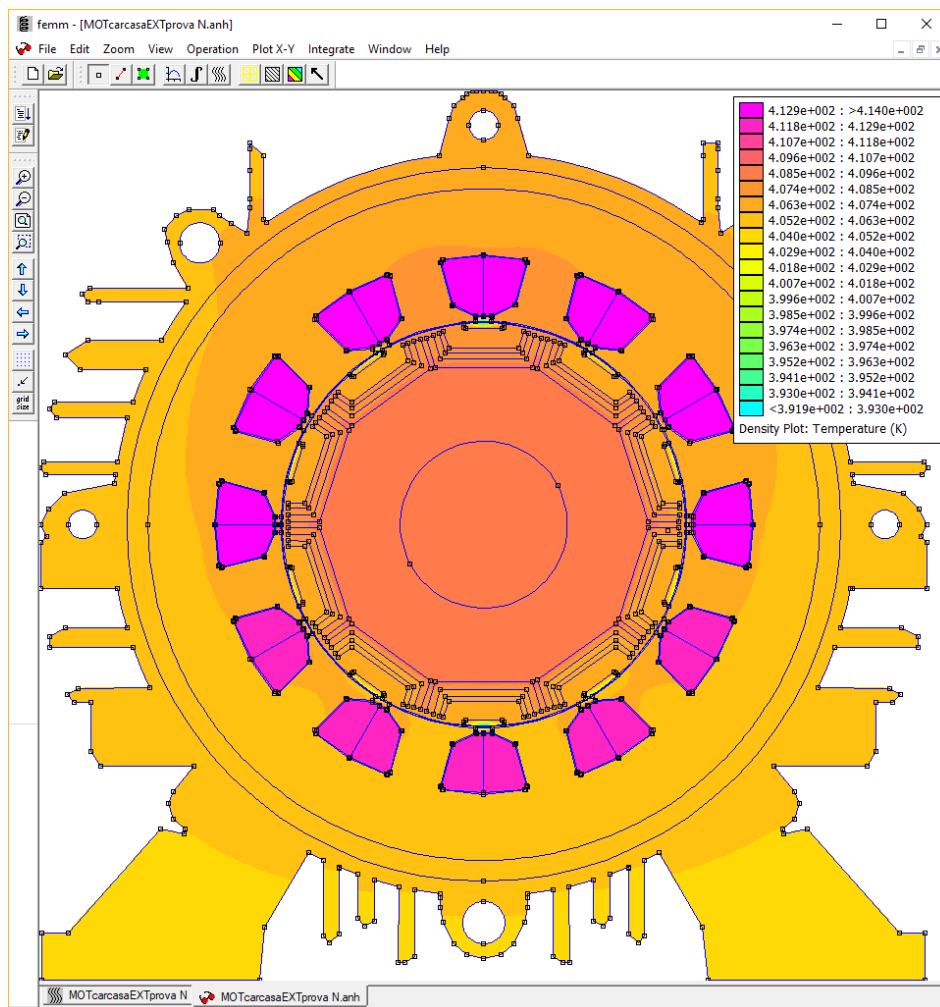
**Taula 4.5.** Valors dels coeficients de convecció en els diferents punts del motor en funció de la velocitat de l'aire

### 4.2.3. Resultats de les simulacions

A continuació es presenten els resultats de l'escalfament de la màquina en els 2 casos principals: convecció natural i convecció forçada.

#### 4.2.3.1. Convecció natural

La distribució de temperatures a la màquina queda de la següent manera:



**Figura 4.21.** Captura de pantalla de la distribució de temperatures amb ventilació natural. (Font: Pròpia)

I en les diferents zones d'aquesta es tindran les següents temperatures:

Tcu	Tsta	Trot	Tcar	Unitats
413,14	406,36	408,59	405,46	K
140,14	133,36	135,59	132,46	Cº

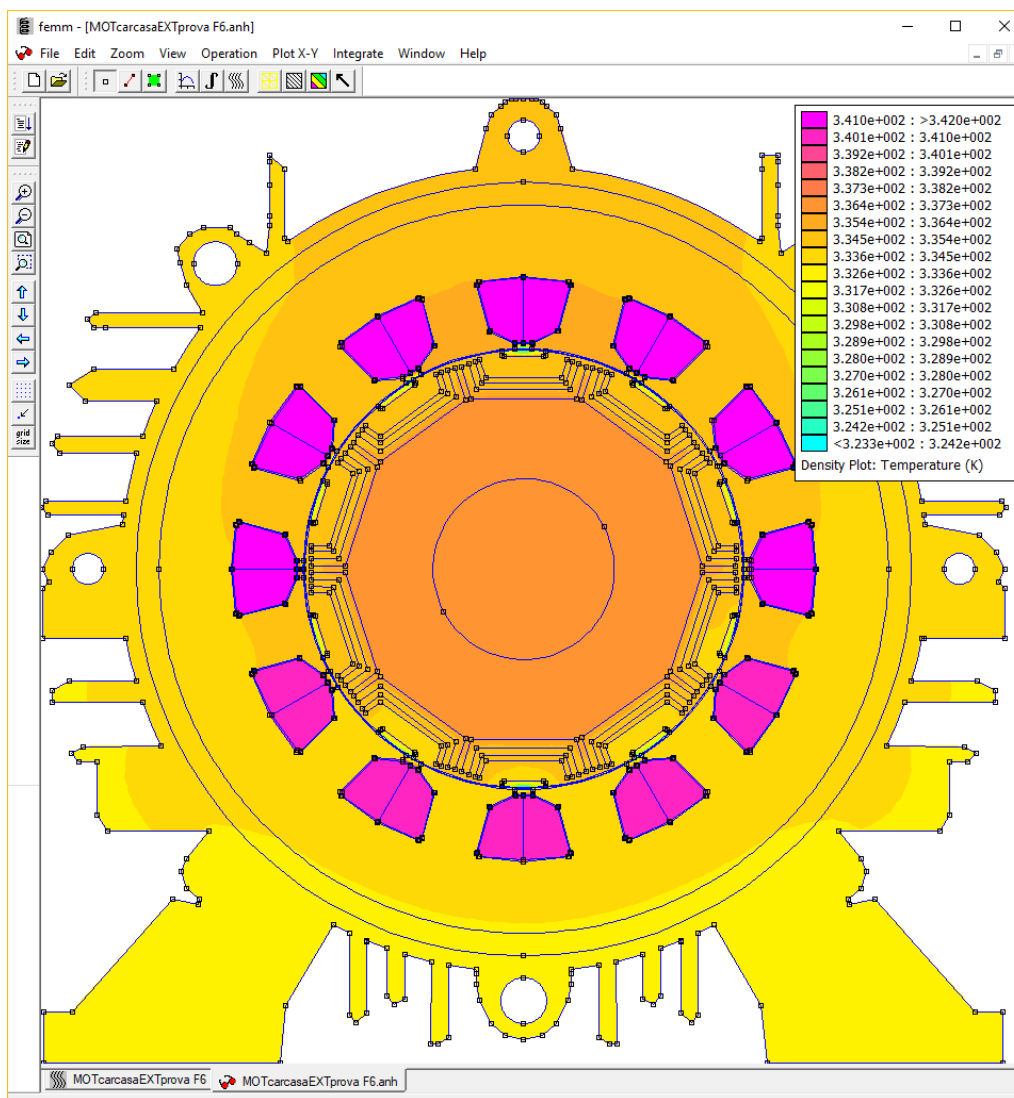


**Taula 4.6.** Valors de la temperatura en diferents punts de la màquina (Convecció natural)

#### 4.2.3.2. Convecció forçada

Es presenten les 3 casuístiques:

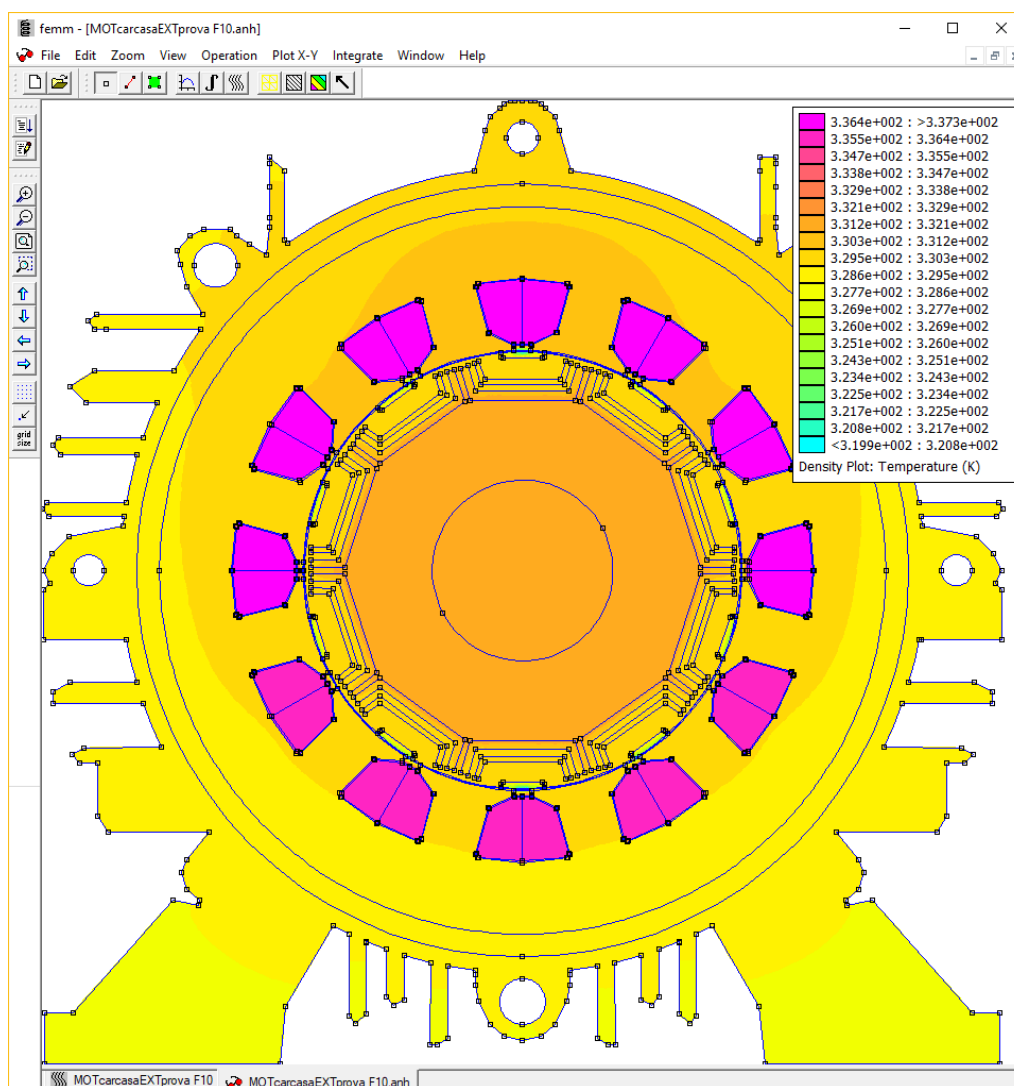
#### VENTILACIÓ A 6 m/s



**Figura 4.22.** Captura de pantalla de la distribució de temperatures amb ventilació forçada 6 m/s. (Font: Pròpia)

I en les diferents zones d'aquesta es tindran les següents temperatures:

Tcu	Tsta	Trot	Tcar	Unitats
341,20	334,43	335,98	333,97	K
68,20	61,43	62,98	60,97	Cº

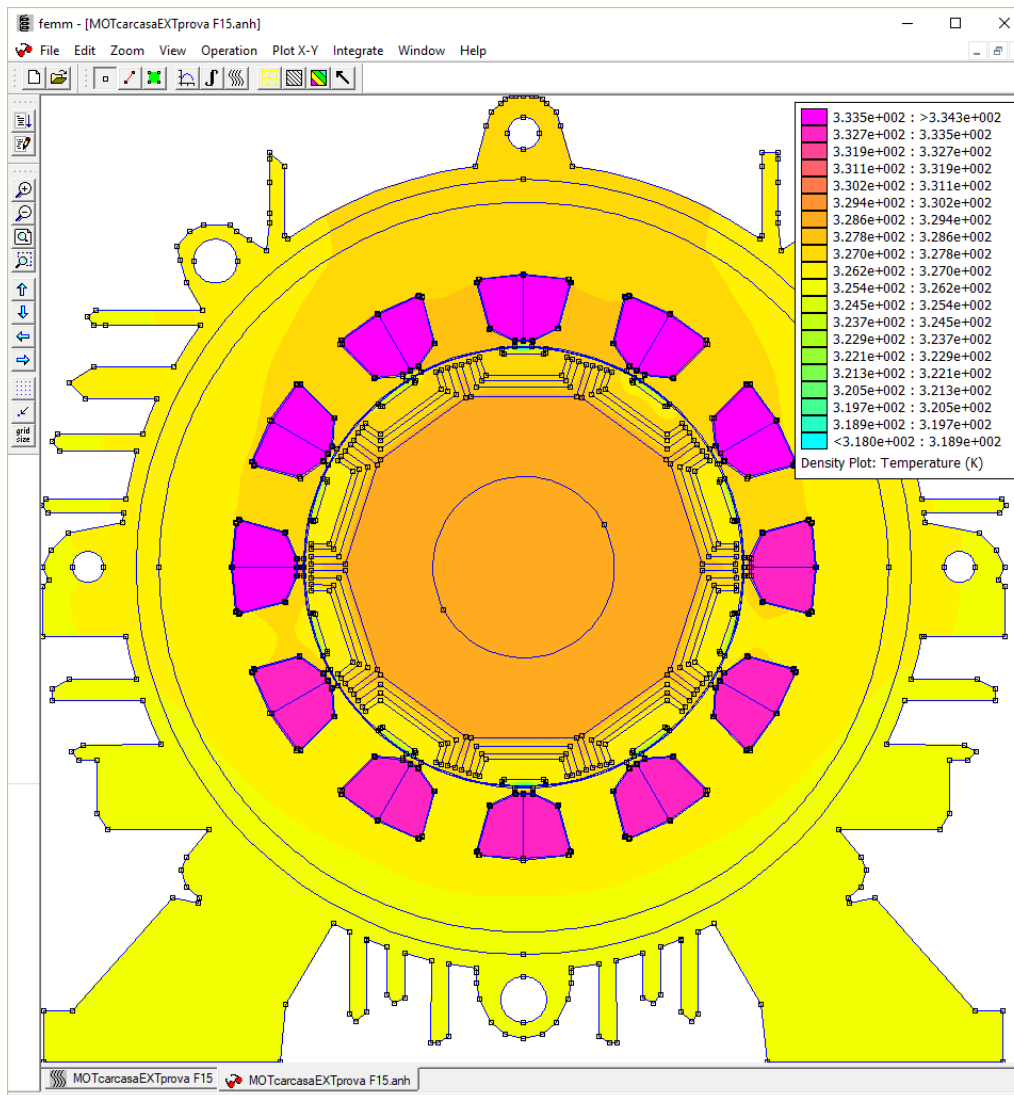
**Taula 4.7.** Valors de la temperatura en diferents punts de la màquina (Convecció forçada 6 m/s)VENTILACIÓ A 10 m/s**Figura 4.23.** Captura de pantalla de la distribució de temperatures amb ventilació forçada 10 m/s. (Font: Pròpia)

I en les diferents zones d'aquesta es tindran les següents temperatures:

Tcu	Tsta	Trot	Tcar	Unitats
336,52	329,75	331,29	328,93	K
63,52	56,75	58,29	55,93	Cº

**Taula 4.8.** Valors de la temperatura en diferents punts de la màquina (Convecció forçada 10 m/s)

## VENTILACIÓ A 15 m/s



**Figura 4.24.** Captura de pantalla de la distribució de temperatures amb ventilació forçada 15 m/s. (Font: Pròpia)

I en les diferents zones d'aquesta es tindran les següents temperatures:

Tcu	Tsta	Trot	Tcar	Unitats
333,57	326,80	328,32	325,99	K
60,57	53,80	55,32	52,99	Cº

**Taula 4.9.** Valors de la temperatura en diferents punts de la màquina (Convecció forçada 15 m/s)



## 5. Rendiment i corbes característiques del Motor tipus

Un dels mètodes emprats per la determinació de les corbes de la màquina a partir de càlculs analítics fets a partir de les inductàncies característiques de la màquina ( $L_d$  i  $L_q$ ), en ocasions, però, hi ha màquines en les que resulta gairebé impossible trobar aquests valors i que corresponguin amb la realitat i, per tant, és molt difícil obtenir unes corbes que s'ajustin al funcionament real de la màquina.

La màquina subjecte d'aquest treball presenta dificultats per ser calculada amb el mètode de les inductàncies característiques i per això s'opta pel càlcul mitjançant La variació de flux.

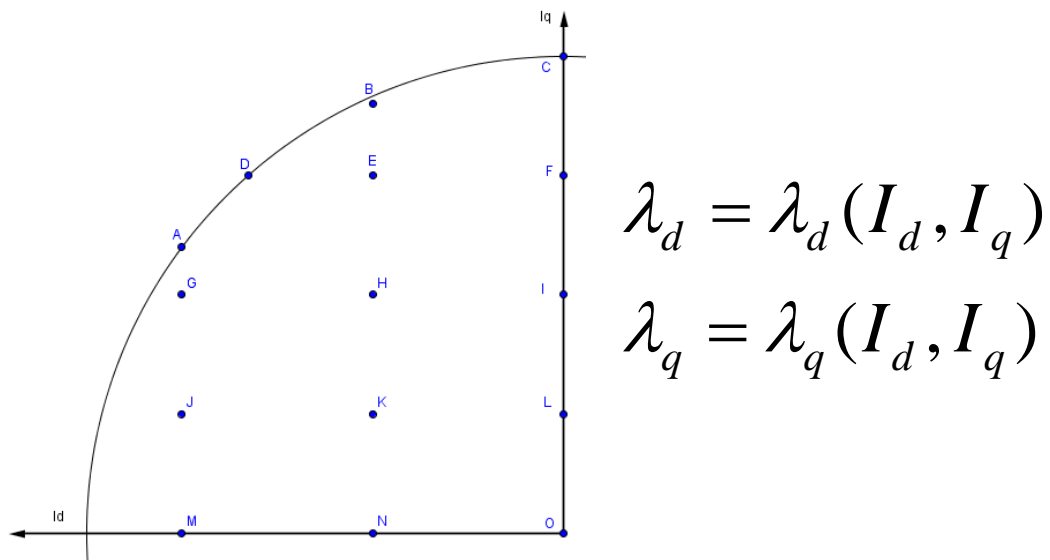
Aquesta metodologia de càlcul s'explica en l'article ***Total-Flux Representation of Synchronous Machines*** (Umans 2014) adjunt en la bibliografia del projecte.

### 5.1. Determinació de les corbes mitjançant el mètode de la variació de flux

Aquest model es basa en determinar les corbes característiques de la màquina mitjançant la variació de les intensitats característiques: Intensitat Directa ( $I_d$ ), que es dona amb el rotor en posició de flux màxim i Intensitat en Quadratura ( $I_q$ ) que es dona amb el rotor amb posició de flux mínim.

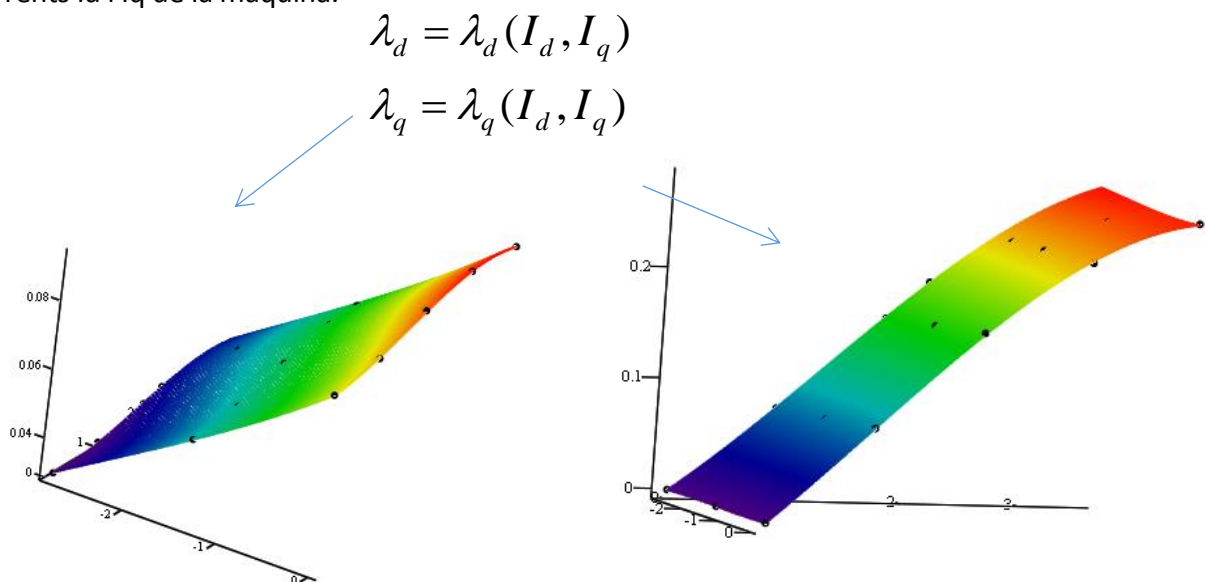
La variació d'aquestes dues intensitats com ja s'indica influeix directament en la variació del flux de la màquina.

El mètode seguit es fonamenta en la determinació de 15 punts característics, amb el quals s'extraurà les característiques del motor síncron.



**Figura 5.1.** Gràfic dels diferents punts característics i fórmules del flux. (Font: Apunts DME)

Amb una interpolació lineal es podran obtenir els gràfics de dependència del flux en funció dels corrents Id i Iq de la màquina.



**Figura 5.2.** Gràfics dels flux magnètic en funció de Id i Iq. (Font: Apunts DME)

Quan ja es tenen les gràfiques simplement s'hauran d'aplicar les següents fórmules per obtenir les corbes de la màquina:

$$\lambda_d = \lambda_d(I_d, I_q)$$

$$\lambda_q = \lambda_q(I_d, I_q)$$

$$U = \omega \cdot \sqrt{\lambda_d^2 + \lambda_q^2}$$

$$T = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\lambda_d \cdot I_q - \lambda_q \cdot I_d)$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

(Eq. 5.1), (Eq. 5.2), (Eq. 5.3), (Eq. 5.4) i (Eq. 5.5)

**Nota:** Per a més detalls sobre el procediment de càlcul, consulteu l'Annex adjunt.

## 5.2. Presentació de les corbes característiques de la màquina

A continuació es presenten les corbes característiques de la màquina síncrona de reluctància, aquestes resulten essencials per comprendre de manera senzilla i entenedora les prestacions que tindrà el motor dissenyat al llarg d'aquest projecte.

Una consideració a tenir en compte és que, finalment, ha sigut necessari disposar el bobinat de la màquina en paral·lel i no en sèrie com s'ha fet en apartats anteriors.

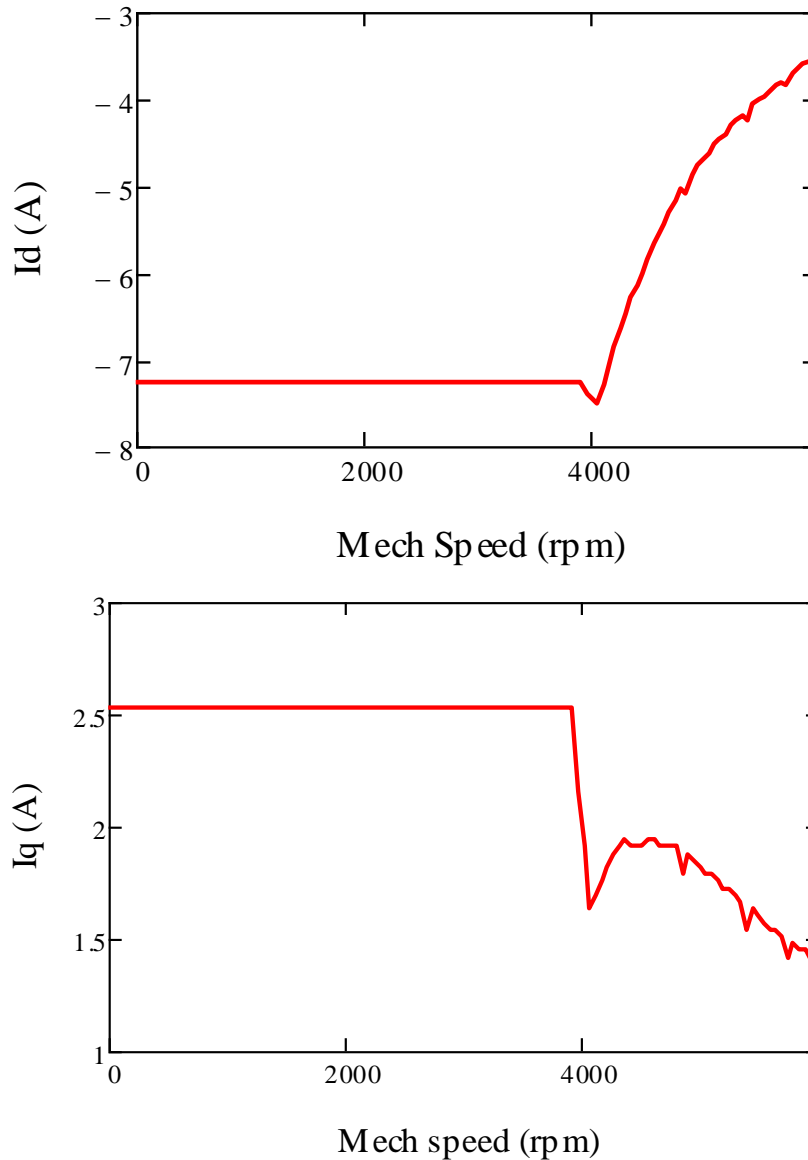
Les implicacions directes d'aquesta modificació bàsicament són: tenir una intensitat total absorbida dues vegades més gran, el voltatge requerit al convertidor és més baix i es redueix 4 vegades de la resistència de fase.

Aquesta modificació s'ha realitzat perquè el voltatge demandat al convertidor era massa elevat.

Les corbes presentades són: Intensitats característiques en funció de la velocitat de rotació, Parell en funció de la velocitat de rotació, Potència entregada en funció de la velocitat de rotació, Eficiència en funció de la velocitat de rotació i voltatge en funció de la velocitat de rotació.

Es pot veure la seva justificació de càlcul a l'Annex adjunt.

### 5.2.1. Intensitats característiques en funció de la velocitat de rotació



**Figures 5.3. i 5.4.** Gràfics de les intensitats Directa i en Quadratura en funció de la velocitat de rotació.

(Font: pròpia)

La Intensitat directa necessària a velocitat nomina ( $N_n$ ) és:  **$I_d = 7,24 \text{ A}$**

La Intensitat en quadratura necessària a velocitat nomina ( $N_n$ ) és:  **$I_q = 2,62 \text{ A}$**



### 5.2.2. Parell en funció de la velocitat de rotació

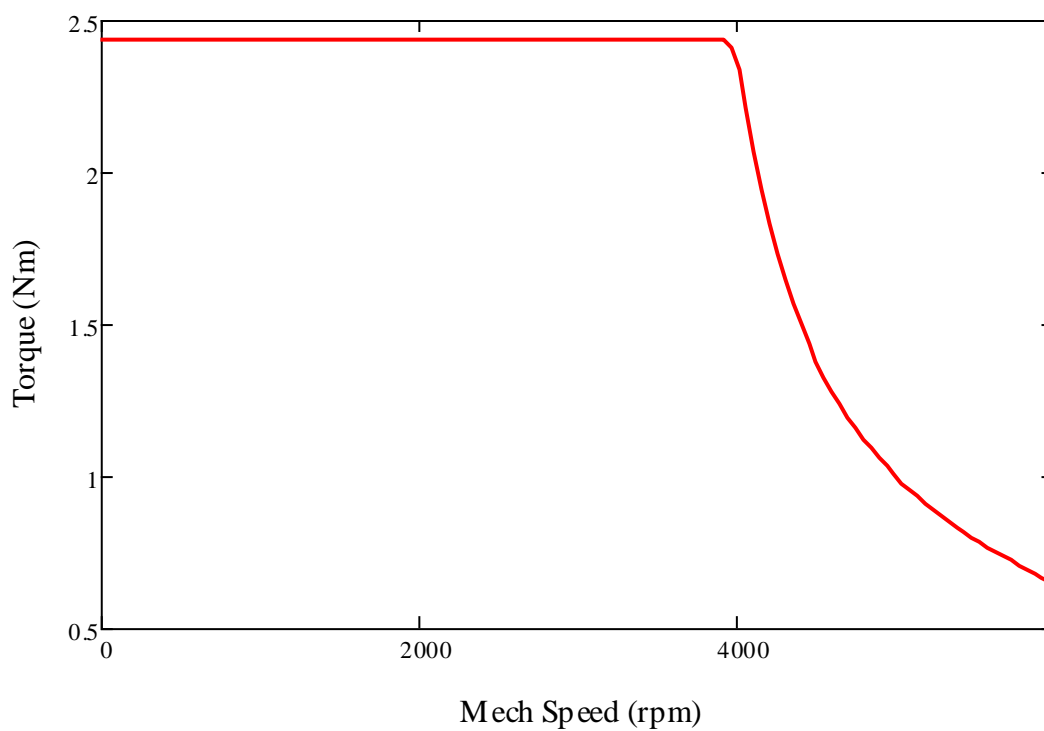
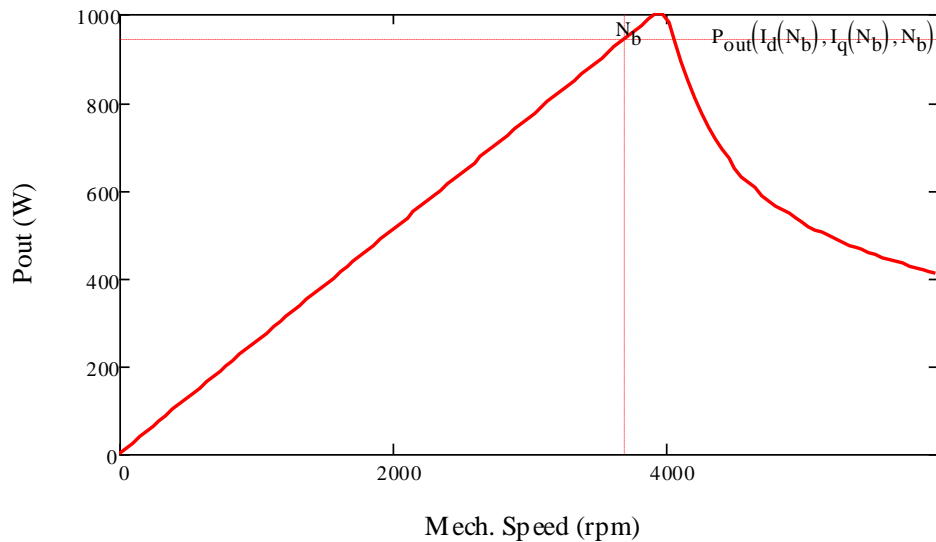


Figura 5.5. Gràfica del parell en funció de la velocitat de rotació (Font: pròpia)

El parell entregat a velocitat nomina ( $N_n$ ) és:  **$M_n = 2,43 \text{ N}\cdot\text{m}$**

La Velocitat base de la màquina és de: **3702 rpm**

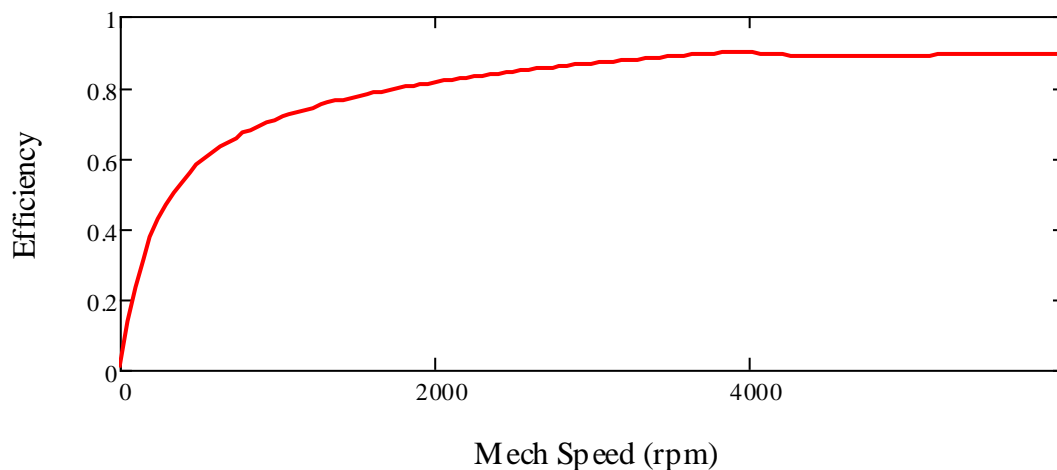
### 5.2.3. Potència entregada en funció de la velocitat de rotació



**Figura 5.6.** Gràfica de la potència entregada en funció de la velocitat de rotació (Font: pròpia)

La potència entregada a velocitat nominal ( $N_n$ ) és:  **$P_n = 763 \text{ W}$**

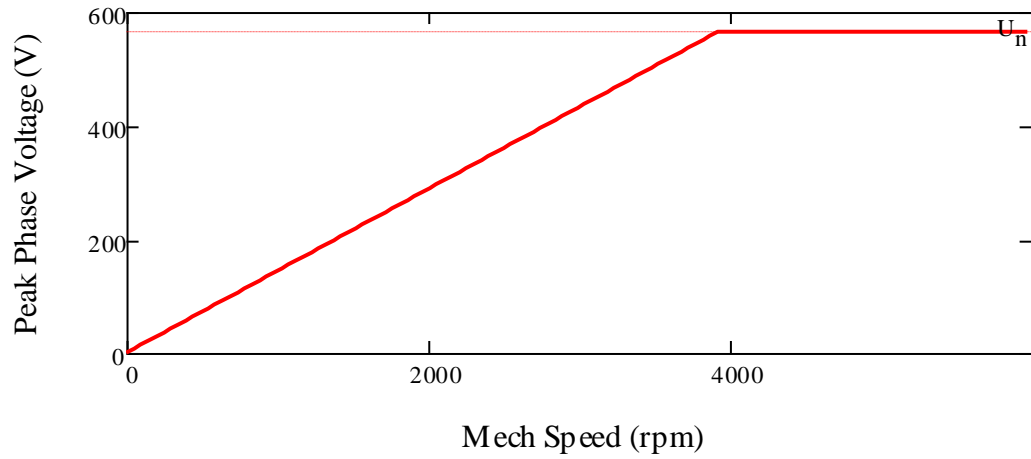
### 5.2.4. Eficiència en funció de la velocitat de rotació



**Figura 5.7.** Gràfica de l'eficiència de la màquina en funció de la velocitat de rotació (Font: pròpia)

La eficiència de la màquina a velocitat nominal ( $N_n$ ) és:  **$E_{f_n} = 86,60\%$**

### 5.2.5. Voltatge en funció de la velocitat de rotació



**Figura 5.8.** Gràfica del voltatge de pic en funció de la velocitat de rotació (Font: pròpia)

El voltatge eficaç necessari perquè la màquina treballi a velocitat nomina ( $N_n$ ) és:  
 **$U_n = 433,27 \text{ V}$ .**

Per tant  **$U_n = 306,37 \text{ V}$**  de tensió màxima.



## 6. Càlcul de la sèrie de motors

En aquest apartat es donaran les dades dels diferents motors, que calculats a partir del motor base, resultarien modificant l'empilat de xapa i el bobinat de la màquina elèctrica.

Com a base per aquest càlcul s'utilitzarà el mateix full de càlcul emprat per determinar les característiques del motor original de la sèrie.

Un cop calculat cada motor es farà una simulació amb el FEMM per comprovar que disposa del parell necessari per complir les especificacions de la potència indicada.

A continuació es mostra un exemple:

Motor original:

Potència nominal:

$$P_2 := 750 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 3000 \quad \text{rpm}$$

Parell nominal:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 2.387 \quad \text{Nm} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 250 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 1.571 \times 10^3 \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Rendiment:

$$\eta := 0.86$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cofi}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\text{max}} = 325.269 \quad \text{(Eq. 6.3)}$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \text{cofi}_n} \quad I_n = 2.622 \quad \text{A} \quad \text{(Eq. 6.4)}$$

### Nou motor (500W):

Potència nominal:

$$P_2 := 500 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 3000 \quad \text{rpm}$$

Parell nomina:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 1.592 \quad \text{Nm} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 250 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 1.571 \times 10^3 \quad (\text{Eq. 6.6})$$

Rendiment:

$$\eta := 0.84$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cofi}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\max} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\max} = 325.269 \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \phi_n} \quad I_n = 1.783 \quad \text{A} \quad (\text{Eq. 6.8})$$

Com es pot observar en els càlculs el parell entregat i la intensitat del nou motor serà diferent al motor original per tant, ja es tenen determinades les noves necessitats de corrent.

El següent pas serà definir la longitud del nou empilat:

Motor original:

Diàmetre escollit:

$$D_e := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_I \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.04 \quad \text{m} \quad (\text{Eq. 6.9})$$



Nou motor (500W):

Diàmetre escollit:

$$D_e := 0.0811 \text{ m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_I \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.027 \text{ m} \quad (\text{Eq. 6.10})$$

Els càlculs mostren que es necessitarà un empilat menor pel motor de la nova potència.

I per últim pas es determinarà el bobinat de la nova màquina:

Motor original:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \text{ ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 2.09 \times 10^3 \quad (\text{Eq. 6.11})$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 174.168 \quad (\text{Eq. 6.12})$$

Motor nou (500W):

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 3.073 \times 10^3 \quad (\text{Eq. 6.13})$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 256.106 \quad (\text{Eq. 6.14})$$

Un cop ja es tenen els resultats del full de càlcul el següent pas serà realitza la simulació per elements finits.

Realitzant aquesta simulació s'ajustaran els valors perquè les característiques siguin les desitjades.

A continuació es presenta els resultats del motor de 500W ja ajustat per elements finits:

Pot (kW)	Mn (Nm)	Cosfi	Un (V)	In (A)	D (mm)	Lfe (mm)	Zr	dc (mm)
0,5	1,592	0,85	130	1,71	81,5	55	300	0,63

**Taula 6.1.** Característiques principals del motor de 500 W.

## 7. Desenvolupament de la sèrie

En aquest apartat es presentarà la sèrie de motors de diferents potències, aquesta estarà conformada per 6 motors de: **0,5, 0,75, 1 i 1,5 kW**. Tots ells amb una velocitat nominal de **3000 rpm** i 3 motors més de **0,5, 0,75 i 1 kW** a **1500 rpm**

### 7.1. Resultats de la sèrie

A continuació es presenta la taula amb les característiques del motors:

SÈRIE A 3000 rpm									
Pot (kW)	Mn (Nm)	Cosfi	Un (V)	In (A)	D (mm)	Lfe (mm)	Zr	dc (mm)	aa
0,5	1,59	0,85	130	1,78	81,5	55	300	0,63	1
0,75	2,39	0,85	130	2,57	81,5	75	212	0,75	1
1	3,18	0,85	130	3,45	81,5	75	200	0,75	1
1,5	4,78	0,85	130	5,1	81,5	125	180	0,8	1
2,2	7,00	0,85	130	7,36	81,5	136	110	1	1
SÈRIE A 1500 rpm									
Pot (kW)	Mn (Nm)	Cosfi	Un (V)	In (A)	D (mm)	Lfe (mm)	Zr	dc (mm)	aa
0,5	3,183	0,85	130	1,78	81,5	75	200	0,75	1
0,75	4,775	0,85	130	2,57	81,5	125	300	0,63	1
1	6,37	0,85	130	3,45	81,5	125	230	0,71	1

**Taula 7.1.** Característiques principals de tota la sèrie de motors de 500 W a 2200 W a 3000 i 1500 rpm.

## 7.2. Viabilitat de la sèrie

Per comprovar-ne la viabilitat i que entregaran el parell desitjat es simularà amb FEMM. Pel que fa als resultats de la simulació s'ha buscat que donin un parell màxim un 12,5% més gran que el parell nominal, ja que s'haurà de salvar la rissada d'aquest i les pèrdues mecàniques.

El parell màxim per cada motor és el següent:

Pot (kW)	Mn (Nm)	Max (Nm)
<b>3000 rpm</b>		
0,5	1,59	1,79
0,75	2,39	2,69
1	3,18	3,58
1,5	4,78	5,37
2,2	7,00	7,88
<b>1500 rpm</b>		
0,5	3,18	3,58
0,75	4,78	5,37
1	6,37	7,17

**Taula 7.2.** Valors del parell màxima vs el nominal en funció de la potència de la màquina.

Un altre aspecte a comprovar serà que la saturació en els diferents punts de la màquina estigui dins d'uns límits raonables, aquests resultats es mostren a l'Annex de càlcul de la sèrie de motors.

Per últim, es realitza una comprovació de l'escalfament de la màquina. Aquesta consisteix en buscar el factor de càrrega de la màquina i que el número obtingut es trobi dins d'un rang de valors.

### **FACTOR de CÀRREGA $k_j$ (W/m<sup>2</sup>)**

La càrrega elèctrica s'estableix indirectament a través de les pèrdues joule pel coeficient que determina la superfície de l'empilat del ferro.

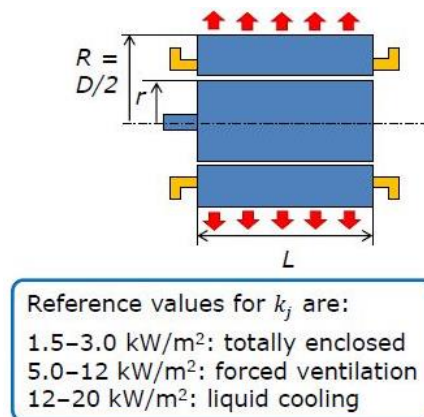
$$k_j = \frac{P_{Cu}}{\text{Superfície del cilindre de l'empilat}} = \frac{\frac{3}{2} R_s \cdot i_o^2}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot L} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

On:

$P_{Cu}$ : Són les pèrdues del coure pel corrent nominal

$R_s$ . És la resistència tèrmica de l'estator per la temperatura nominal

No es considerarà intercanvi de temperatura fora del cilindre de l'estator i nomé es tindran en compte la calor generada per les pèrdues al coure.



**Figura 7.1.** Imatge il·lustrativa del càlcul de  $K_j$  i valors de referència del coeficient (Font: Apunts ME)

Així, tal i com s'indica a la imatge superior depenent del valor del coeficient  $k_j$  s'haurà de considerar un dels tres tipus de ventilació.

Per tant l'objectiu serà que el  $K_j$  de les diferents màquines es trobi dins del rang de ventilació forçada, igual que la màquina original.

Els resultats d'aquest factor dels diferents motors són els següents:

Pot (kW)	D (mm)	Lfe (mm)	kj
<b>3000 rpm</b>			
0,5	81,5	55	5,33
0,75	81,5	75	5,86
1	81,5	75	7,81
1,5	81,5	125	7,03
2,2	81,5	136	9,48
<b>1500 rpm</b>			
0,5	81,5	75	3,91
0,75	81,5	125	3,52
1	81,5	125	4,69

**Taula 7.3.** Valors del coeficient  $K_j$  de cadascuna de les màquines.

Així, totes les màquines es troben dins del rang desitjat i es pot determinar la seva viabilitat en primera instància.

## 8. Anàlisi de l'impacte ambiental

Primerament, esmentar que l'anàlisi d'aquest punt dins d'aquest projecte, atesa la seva tipologia i abast, és limitat i només es faran unes poques consideracions.

Pel que fa al disseny de la màquina l'únic factor que implica un impacte mediambiental és la realització de simulacions amb ordinador. Aquest consumeix energia elèctrica i les simulacions es poden estendre diverses hores o dies en les que l'ordinador estarà treballant i consumint electricitat. L'energia procedeix de la xarxa elèctrica i com es sabut no procedeix de fonts 100% renovables, per tant s'haurà de considerar una generació de CO<sub>2</sub> i possibles residus radioactius procedents de la generació d'energia elèctrica.

Un altre aspecte a considerar, que podria ser d'implicació directa amb el treball, seria la creació d'un prototip basat amb els resultats d'aquest document.

El prototip estaria conformat en la totalitat per materials reciclables ja que una màquina elèctrica esta formada en la major part per metalls (ferro, alumini i coure) i aquests presenten una gran reciclabilitat. Pel que fa al plàstic dels aïllaments, cal dir que és mínim, així com també cal tenir en compte que la majoria de polímers es reciclen fàcilment.

Per últim, una conseqüència directa que podria tenir el treball és la comercialització d'una sèrie de motors d'elevada eficiència energètica.

El fet de que els motors siguin eficients energèticament és de gran importància per l'estalvi energètic que comporta, ja que en dades d'ABB (<http://new.abb.com>) la indústria suposa un 40% del consum elèctric mundial i dins d'aquest 40%, 2/3 parts és conseqüència del motors elèctrics.





## Conclusions

Un cop finalitzat el projecte arriba el moment d'extreure diverses consideracions i revisar els objectius inicials per determinar si s'han complert satisfactòriament.

Pel que fa a la selecció d'una geometria (del rotor) òptima, es pot concloure que s'ha assolit. El motor tipus inicial compleix amb escreix les característiques requerides i el parell obtingut mostra un baix nivell de rissada en comparació a altres màquines d'aquesta tipologia (Màquina Síncrona de Reluctància).

En quan a les prestacions requerides a nivell teòric: Parell nomina, Intensitat nominal, Saturació del ferro. S'aconsegueixen els objectius i així es demostra amb la simulació magnètica per Elements Finites (Software FEMM). La Resta de prestacions també queden justificades a les corbes característiques de la màquina obtingudes amb el mètode de la variació de flux magnètic.

Una altra part en que també s'ha demostrat viable la màquina ha sigut en l'escalfament. L'anàlisi tèrmica per Elements Finites (Software FEMM) mostra uns rangs de temperatures de treball adequats, tan pel que fa als materials susceptibles a patir danys amb la temperatura (aïllaments del bobinat), com per la seguretat dels possibles usuaris, presentant una temperatura dins dels límits legals.

La que es podria considerar "part més important" a complir per aquest motor: la eficiència energètica. També s'han abastat els objectius inicials i aquest podria ser etiquetat amb el qualificatiu IE5, almenys a nivell analític i d'elements finits, que és l'abast d'aquest treball acadèmic.

Per últim i pel que fa al dimensionament del diferents motors que conformen la sèrie, comentar que en primera instància compleixen els requisits indicats i que seria necessari una anàlisi més exhaustiva de cada màquina per a poder fer els ajustos necessaris per assegurar el compliment de les prestacions prescrites.



## Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

Pressupost: Disseny i fabricació de prototips d'una sèrie de Motors Síncrons de Reluctància				
3000 rpm				
12r10p-55mm 500W	Qua.	Ut	€/Ut	€
EST. M-19 De-Di 135-82,7mm/1mm	55,00	mm	0,88 €	48,40 €
ROT. M-19 De-Di 81,1-33,58mm/1mm	55,00	mm	0,64 €	35,20 €
EIX normal. 33,6mm	1,00	Ut	4,50 €	4,50 €
Fil de coure	0,78	Kg	7,10 €	5,53 €
Ajust eix+mecanit.	1,00	Ut	65,00 €	65,00 €
Bobinat estator	1,00	Ut	145,00 €	145,00 €
Carcasa exterior LEER 90 LR-B 3Ro + Vent	1,00	Ut	45,00 €	45,00 €
Circlips Din471	2,00	Ut	0,56 €	1,12 €
SUBTOTAL				349,75 €
IVA 21%				73,45 €
TOTAL MOTOR				423,20 €
12r10p-75mm 750W	Qua.	Ut	€/Ut	€
EST. M-19 De-Di 135-82,7mm/1mm	75,00	mm	0,88 €	66,00 €
ROT. M-19 De-Di 81,1-33,58mm/1mm	75,00	mm	0,64 €	48,00 €
EIX normal. 60mm	1,00	Ut	4,50 €	4,50 €
Fil de coure	0,88	Kg	7,10 €	6,26 €
Ajust eix+mecanit.	1,00	Ut	65,00 €	65,00 €
Bobinat estator	1,00	Ut	145,00 €	145,00 €
Carcasa exterior LEER 90 LR-B 3Ro + Vent	1,00	Ut	45,00 €	45,00 €
Circlips Din471	2,00	Ut	0,56 €	1,12 €
SUBTOTAL				380,88 €
IVA 21%				79,98 €
TOTAL MOTOR				460,86 €

<b>12r10p-75mm 1000W</b>	<b>Qua.</b>	<b>Ut</b>	<b>€/Ut</b>	<b>€</b>
EST. M-19 De-Di 135-82,7mm/1mm	75,00	mm	0,88 €	66,00 €
ROT. M-19 De-Di 81,1-33,58mm/1mm	75,00	mm	0,64 €	48,00 €
EIX normal. 60mm	1,00	Ut	4,50 €	4,50 €
Fil de coure	0,83	Kg	7,10 €	5,90 €
Ajust eix+mecanit.	1,00	Ut	65,00 €	65,00 €
			145,00	
Bobinat estator	1,00	Ut	€	145,00 €
Carcasa exterior LEER 90 LR-B 3Ro + Vent	1,00	Ut	45,00 €	45,00 €
Circlips Din471	2,00	Ut	0,56 €	1,12 €
<b>SUBTOTAL</b>				<b>380,52 €</b>
<b>IVA 21%</b>				<b>79,91 €</b>
<b>TOTAL MOTOR</b>				<b>460,43 €</b>
<b>12r10p-125mm 1500W</b>	<b>Qua.</b>	<b>Ut</b>	<b>€/Ut</b>	<b>€</b>
EST. M-19 De-Di 135-82,7mm/1mm	125,00	mm	0,88 €	110,00 €
ROT. M-19 De-Di 81,1-33,58mm/1mm	125,00	mm	0,64 €	80,00 €
EIX normal. 60mm	1,00	Ut	4,50 €	4,50 €
Fil de coure	1,09	Kg	7,10 €	7,77 €
Ajust eix+mecanit.	1,00	Ut	65,00 €	65,00 €
			145,00	
Bobinat estator	1,00	Ut	€	145,00 €
Carcasa exterior LEER 90 LR-B 3Ro + Vent	1,00	Ut	45,00 €	45,00 €
Circlips Din471	2,00	Ut	0,56 €	1,12 €
<b>SUBTOTAL</b>				<b>458,39 €</b>
<b>IVA 21%</b>				<b>96,26 €</b>
<b>TOTAL MOTOR</b>				<b>554,65 €</b>
<b>12r10p-136mm 2200W</b>	<b>Qua.</b>	<b>Ut</b>	<b>€/Ut</b>	<b>€</b>
EST. M-19 De-Di 135-82,7mm/1mm	136,00	mm	0,88 €	119,68 €
ROT. M-19 De-Di 81,1-33,58mm/1mm	136,00	mm	0,64 €	87,04 €
EIX normal. 60mm	1,00	Ut	4,50 €	4,50 €
Fil de coure	1,10	Kg	7,10 €	7,78 €
Ajust eix+mecanit.	1,00	Ut	65,00 €	65,00 €
			145,00	
Bobinat estator	1,00	Ut	€	145,00 €
Carcasa exterior LEER 90 LR-B 3Ro + Vent	1,00	Ut	45,00 €	45,00 €
Circlips Din471	2,00	Ut	0,56 €	1,12 €
<b>SUBTOTAL</b>				<b>475,12 €</b>
<b>IVA 21%</b>				<b>99,78 €</b>
<b>TOTAL MOTOR</b>				<b>574,90 €</b>

1500 rpm				
12r10p-55mm 500W	Qua.	Ut	€/Ut	€
EST. M-19 De-Di 135-82,7mm/1mm	75,00	mm	0,88 €	66,00 €
ROT. M-19 De-Di 81,1-33,58mm/1mm	75,00	mm	0,64 €	48,00 €
EIX normal. 33,6mm	1,00	Ut	4,50 €	4,50 €
Fil de coure	0,83	Kg	7,10 €	5,90 €
Ajust eix+mecanit.	1,00	Ut	65,00 €	65,00 €
Bobinat estator	1,00	Ut	145,00 €	145,00 €
Carcasa exterior LEER 90 LR-B 3Ro + Vent	1,00	Ut	45,00 €	45,00 €
Circlips Din471	2,00	Ut	0,56 €	1,12 €
SUBTOTAL				380,52 €
IVA 21%				79,91 €
TOTAL MOTOR				460,43 €
12r10p-75mm 750W	Qua.	Ut	€/Ut	€
EST. M-19 De-Di 135-82,7mm/1mm	125,00	mm	0,88 €	110,00 €
ROT. M-19 De-Di 81,1-33,58mm/1mm	125,00	mm	0,64 €	80,00 €
EIX normal. 60mm	1,00	Ut	4,50 €	4,50 €
Fil de coure	1,13	Kg	7,10 €	8,03 €
Ajust eix+mecanit.	1,00	Ut	65,00 €	65,00 €
Bobinat estator	1,00	Ut	145,00 €	145,00 €
Carcasa exterior LEER 90 LR-B 3Ro + Vent	1,00	Ut	45,00 €	45,00 €
Circlips Din471	2,00	Ut	0,56 €	1,12 €
SUBTOTAL				458,65 €
IVA 21%				96,32 €
TOTAL MOTOR				554,97 €
12r10p-75mm 1000W	Qua.	Ut	€/Ut	€
EST. M-19 De-Di 135-82,7mm/1mm	125,00	mm	0,88 €	110,00 €
ROT. M-19 De-Di 81,1-33,58mm/1mm	125,00	mm	0,64 €	80,00 €
EIX normal. 60mm	1,00	Ut	4,50 €	4,50 €
Fil de coure	1,10	Kg	7,10 €	7,82 €
Ajust eix+mecanit.	1,00	Ut	65,00 €	65,00 €
Bobinat estator	1,00	Ut	145,00 €	145,00 €
Carcasa exterior LEER 90 LR-B 3Ro + Vent	1,00	Ut	45,00 €	45,00 €
Circlips Din471	2,00	Ut	0,56 €	1,12 €
SUBTOTAL				458,44 €
IVA 21%				96,27 €
TOTAL MOTOR				554,71 €

SUBTOTAL COST SERIE DE MOTORS	3.342,28 €
IVA 21% TOTAL SÈRIE	701,88 €
TOTAL SERIE DE MOTORS	4.044,16 €

COSTOS ENGINYERIA	Qua.	Ut	€/Ut	DTE	
DISSENY DEL MOTOR	180,00	h	19,00 €		3.420,00 €
PROVES SIMULACIONS I FEMM	480,00	h	19,00 €	50,00%	4.560,00 €
TRACTAMENT DE DADES I DOCUMENTACIÓ	220,00	h	19,00 €		4.180,00 €
TOTAL COSTOS ENGINYERIA					12.160,00 €

TOTAL COSTOS ENGINYERIA + PROTOTIPS	16.204,16 €
-------------------------------------	-------------

## Bibliografia

BARGALLÓ PERPIÑÀ, RAMON: *Apunts de Màquines Elèctriques* (2009)

ESCUDE RIBA, JORDI 2013: *Disseny d'una sèrie de motors síncrons d'imants permanents*

FERDOUS, S.M. et al.: "MTPA and field weakening control of synchronous reluctance motor. Dins: *Proceedings of 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering*. ICECE, 2016, p. 598-601. DOI 10.1109/ICECE.2016.7853991.

LENDENMANN, Heinz; MOGHADDAM, Reza R.; TAMMI, Ari; L.-E.T.: "¡Que vienen!". Dins: *Revista ABB*, 2011, Vol. 1.

PELLEGRINO, G. et al. (2016): *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors*. 2016 [en línia]. ISBN 978-3-319-32200-1. DOI 10.1007/978-3-319-32202-5.

- Disponible a: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32202-5>.

Spargo, C M, B C Mecrow, J D Widmer, C Morton, and N J Baker. 2015. "Design and Validation of a Synchronous Reluctance Motor With Single Tooth Windings." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 30 (2):795–805.

UMANS, S.D.: "Total-Flux Representation of Synchronous Machines". Dins: *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014. Vol. 2, núm. 2, pàg. 341-347. ISSN 21686785. DOI 10.1109/JESTPE.2013.2279092.

"El gasto energético en la industria". Dins: *Revista ABB*, 2018 [en línia].

- Disponible a: <http://new.abb.com/drives/es/eficiencia-energetica/gasto-energetico-industria>.





## **ANNEXOS**

- A. CÀLCULS (DIMENSIONAMENT I CARACTERÍSTIQUES)**
- B. CÀLCUL DE PÈRDUES MAGNÈTIQUES (MODEL DE BERTOTTI)**
- C. OBTENCIÓ D'UNA GEOMETRIA ÒPTIMA MITJANÇANT SyR-e**
- D. CODIS LUA EMPRATS A LA SIMULACIÓ AMB ELEMENTS FINITS**
- E. PLÀNOLS**
- F. DOCUMENTACIÓ D'INTERÈS**

**Annex A - CÀLCULS**  
**(DIMENSIONAMENT I CARACTERÍSTIQUES)**

En Aquest annex es recullen tots els càlculs relacionats amb el dimensionament de les diferents màquines que sorgeixen durant el projecte: des dels càlculs inicials de la màquina model, les corbes característiques de la mateixa fins els càlcul per dimensionar les diferents màquines de la sèrie.

## 1. Dimensionament inicial de la màquina tipus

### DADES PRINCIPALS:

Potència nominal:

$$P_2 := 750 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 3000 \quad \text{rpm}$$

Parell nomina:

$$M_n := \frac{P_2}{\frac{N_N}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{60}}} \quad M_n = 2.387 \quad \text{Nm}$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 250 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 1.571 \times 10^3$$

Rendiment:

$$\eta := 0.86$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cofi}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\text{max}} = 325.269$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \text{cofi}_n} \quad I_n = 2.622 \quad \text{A}$$

### DIMENSIONS DEL ROTOR:

K<sub>i</sub> relació entre valor màxim de la corrent i el seu valor eficaç

K<sub>e</sub> relació entre valor màxim i l'eficaç de la tensió

K<sub>p</sub> coeficient de forma de la potència

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_i := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5$$

Coeficient de permeabilitat en el buit:

$$\mu_0 := 4 \frac{\pi}{1000000} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Relació Longitud/Diàmetre:

$$K_I := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537$$

Capa de corrent (Entre 20 i 65000 A/m):

$$A_s := 2000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Inducció a l'entreferro:

$$B_e = 0.7 \quad \text{T}$$

Determinació del diàmetre de la màquina:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_I \cdot K_p \cdot K_l \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.079$$

Diàmetre escollit:

$$D_m := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_I \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.04 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat escollida:

$$L_{fe} = 0.075 \quad \text{m}$$

Entreferro:

$$\text{entref} := 0.18 + 0.006 P_2^{0.4} \quad \text{entref} = 0.265$$

Entreferro escollit:

$$g_g := 0.3 \quad \text{mm}$$

### CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTATOR:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 2.09 \times 10^3$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 174.168$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$\underline{Z_t} := 212 \quad \underline{Z_t} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 2.544 \times 10^3$$

### SECCIÓ DELS CONDUCTORS:

Densitat de corrent permesa:

$$\Delta := \epsilon \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Nombre de fils en paral·lel:

$$aa := 1$$

Superfície i diàmetre del conductor:

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.437 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 0.746 \text{ mm}$$

Diàmetre i superfície del conductor escollit:

$$d_c := 0.75 \text{ mm} \quad S_c := aa \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} = 0.442 \text{ mm}^2$$

Superfície ocupada pel conductor:

$$s_{\text{ocupada}} := aa \cdot Z_T \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \quad s_{\text{ocupada}} = 93.659 \text{ mm}^2$$

Superfície de la ranura:

$$S_r := (117) \cdot 2 \text{ mm}^2$$

Factor d'ocupació (Com a màxim 0,4):

$$F_o := \frac{s_{\text{ocupada}}}{S_r} \quad F_o = 0.4$$

## 2. Corbes característiques de la màquina tipus.

Per tal de determinar les característiques principals del funcionament del motor síncron de reluctància serà necessari del traçat de les corbes característiques de la màquina, els gràfics permetran observar a simple vista les prestacions de la màquina en funció de la seva velocitat de rotació.

Tal i com s'explica a la memòria inicialment s'hauran d'extreure els valors del flux en funció del corrent, conformant una matriu de 15 punts que servirà per elaborar els càlculs d'aquest apartat.

Iq	Id	LambdaQ	LambdaD
7,24E+06	-7,24E+06	2,38E+05	-2,09E+05
7,24E+06	-3,62E+06	2,65E+05	-1,37E+05
7,24E+06	0	2,72E+05	-3,39E+04
5,43E+06	-4,79E+06	2,20E+05	-1,78E+05
5,43E+06	-3,62E+06	2,28E+05	-1,50E+05
5,43E+06	0	2,40E+05	-3,09E+04
3,62E+06	-7,24E+06	1,58E+05	-2,35E+05
3,62E+06	-3,62E+06	1,84E+05	-1,61E+05
3,62E+06	0	1,82E+05	-1,99E+04
1,81E+06	-7,24E+06	1,07E+05	-2,44E+05
1,81E+06	-3,62E+06	1,10E+05	-1,65E+05
1,81E+06	0	9,70E+04	-7,23E+03
0	-7,24E+06	0	-2,43E+05
0	-3,62E+06	0	-1,54E+05
0	0	0	0

**Taula 2.1.** Valors del flux directe i en quadratura en funció dels corrents Id i Iq.



### DADES GENERALS:

Parells de pols:

$$p := 5$$

Corrent de fase (Valor de pic):

$$I_s := 7.7$$

Voltatge de fase (Valor de pic)

$$U_n := 400\sqrt{2}$$

Resistència de fase:

$$R_s := \frac{3}{4}$$

### DADES D'ENTRADA DE FITXER EXTERN

`dataFEA := READFILE("femm_saturation_model1bis.txt", "delimited")`

$$I_q := \text{submatrix}(\text{dataFEA}^{\langle 0 \rangle}, 1, \text{last}(\text{dataFEA}^{\langle 0 \rangle}), 0, 0)$$

$$I_d := \text{submatrix}(\text{dataFEA}^{\langle 1 \rangle}, 1, \text{last}(\text{dataFEA}^{\langle 0 \rangle}), 0, 0)$$

$$\lambda_q := \text{submatrix}(\text{dataFEA}^{\langle 2 \rangle}, 1, \text{last}(\text{dataFEA}^{\langle 0 \rangle}), 0, 0)$$

$$\lambda_d := \text{submatrix}(\text{dataFEA}^{\langle 3 \rangle}, 1, \text{last}(\text{dataFEA}^{\langle 0 \rangle}), 0, 0)$$

### CÀLCULS DE LES CARACTERÍSTIQUES A PARTIR DE LES DADES:

$$M := \text{augment}(I_d, I_q)$$

Order of the adjust function       $n := 3$

$$\text{Regression} \quad R_d := \text{regress}(M, \lambda_d, n)$$

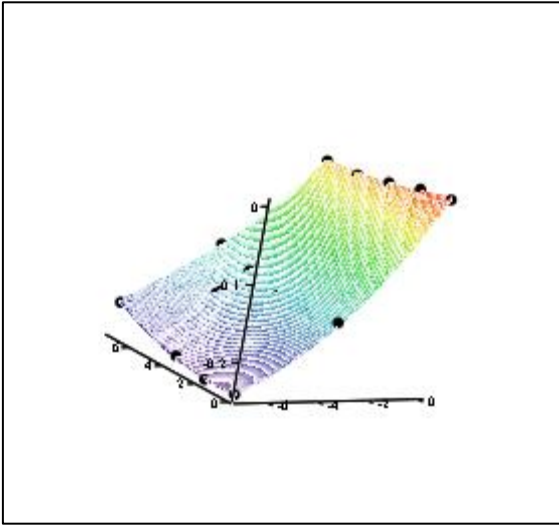
$$R_q := \text{regress}(M, \lambda_q, n)$$

$$\text{Interpolation} \quad f_d(x, y) := \text{interp}\left[R_d, M, \lambda_d, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right]$$

$$f_q(x,y) := \text{interp}\left[R_q, M, \lambda_q, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right]$$

d-axis flux surface

$$F_d := \text{CreateMesh}\left(f_d, \min(I_d), \max(I_d), \min(I_q), \max(I_q), 200, 200\right)$$



$$\min(I_d) = -7.24$$

$$\max(I_d) = 0$$

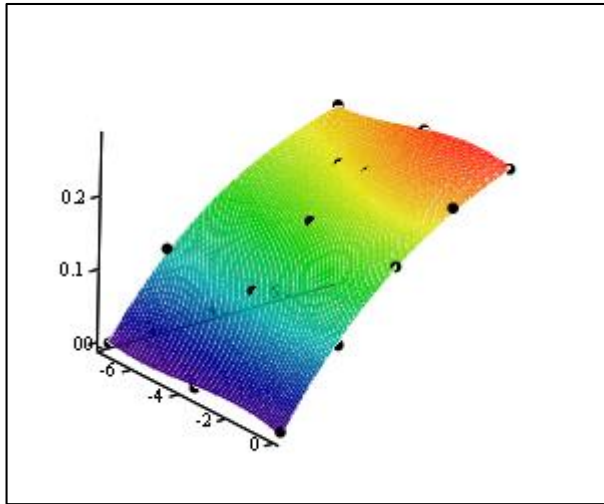
$$\min(I_q) = 0$$

$$\max(I_q) = 7.24$$

$$F_d, (I_d, I_q, \lambda_d)$$

q-axis flux surface

$$F_q := \text{CreateMesh}\left(f_q, \min(I_d), \max(I_d), \min(I_q), \max(I_q), 200, 200\right)$$



$$F_q(I_d, I_q, \lambda_q)$$

EQUACIONS CARACTERÍSTIQUES DEL MOTOR:

Parell en funció de les intensitats característiques:

$$M(I_d, I_q) := 3 \cdot \frac{P}{2} \cdot (f_d(I_d, I_q) \cdot I_q - f_q(I_d, I_q) \cdot I_d)$$

Voltatge de fase en funció de les intensitats característiques i omega:

$$V_l(I_d, I_q) := \sqrt{f_d(I_d, I_q)^2 + f_q(I_d, I_q)^2}$$

$$V_{ph}(I_d, I_q, \omega) := \omega \cdot V_l(I_d, I_q)$$

Intensitat de fase en funció de  $I_d$  i  $I_q$ :

$$I_{ph}(I_d, I_q) := \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

Equació de la velocitat de la màquina en funció de les intensitats característiques:

$$N_{rpm}(I_d, I_q) := \frac{U_n}{V_l(I_d, I_q)} \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot p}$$

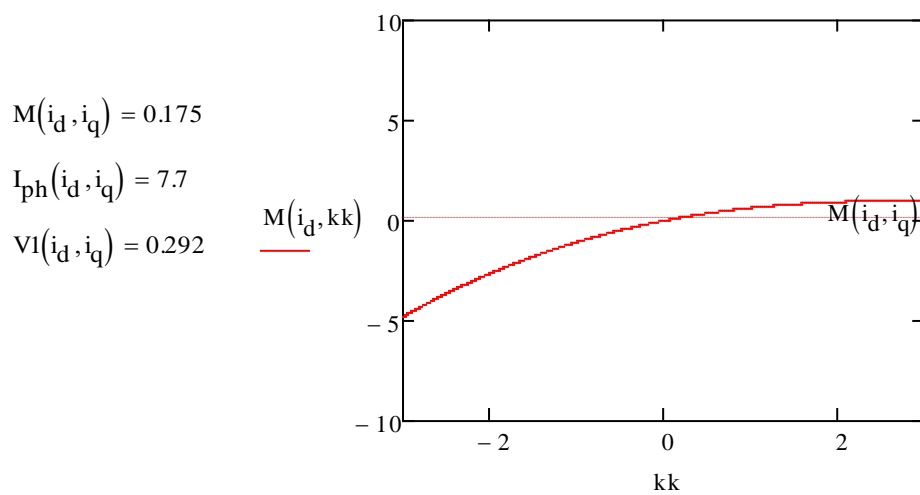
PARELL MÀXIM A CORRENT MÀXIM:

$$x := -2.1 \quad y := 2.1$$

Dado

$$I_s^2 = I_{ph}(x, y)^2 \quad \text{Minimize } (-M(x, y))$$

$$\begin{aligned} -I_s &\leq x \leq 0 \\ 0 &\leq y \leq I_s \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} := \text{Find}(x, y) \quad \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.309 \\ 6.381 \end{pmatrix}$$



### VELOCITAT BASE:

$$\omega := 500\pi$$

Dado

$$U_n = V_{ph}(i_d, i_q, \omega)$$

$$\omega_b := \text{Find}(\omega) = 1.938 \times 10^3 \quad N_b := \frac{\omega_b}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{60}{p} = 3702$$

$$V_{ph}(i_d, i_q, \omega_b) = 565.685$$

### CORRENT DE CURTCIRCUIT:

$$x := -3$$

Dado

$$f_d(x, 0) = 0$$

$$x \leq 0$$

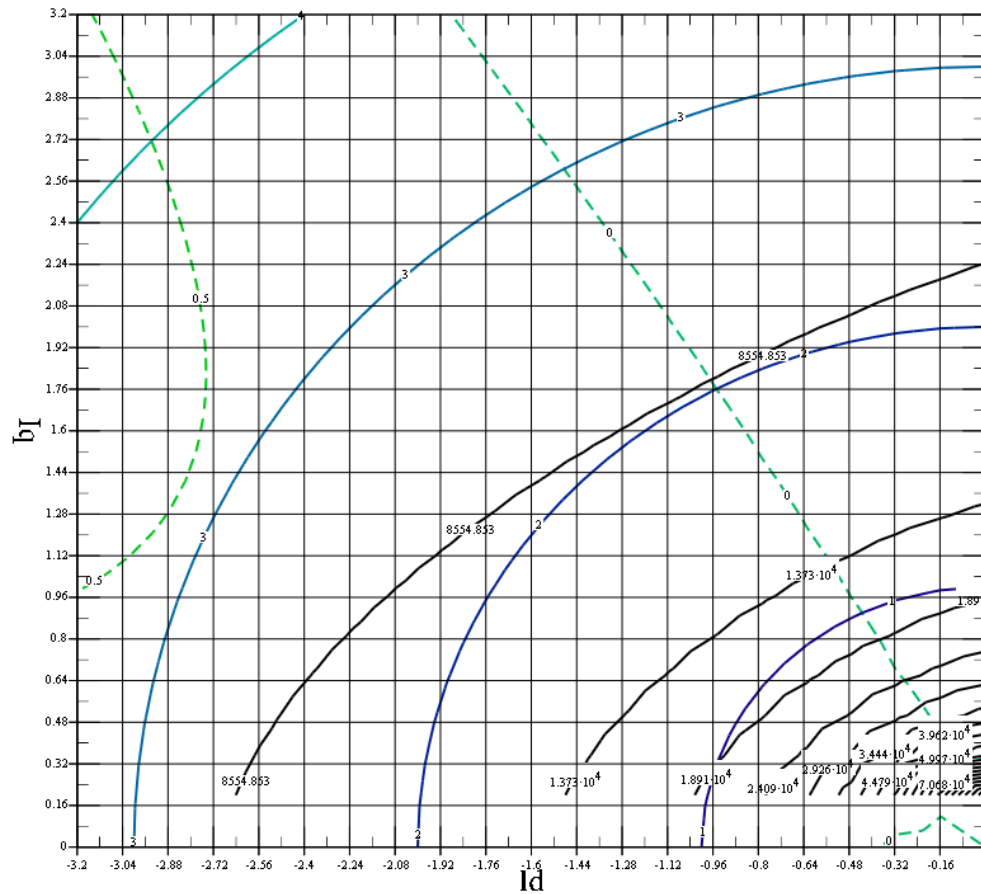
$$I_{sc} := \text{Find}(x) = -0.047$$

## TRAÇAT DE $I_q$ EN FUNCIO DE $I_d$

Constant current  $I_m := \text{CreateMesh} (I_{ph}, -I_s, 0, 0, I_s, 50, 50)$

Constant torque  $M_m := \text{CreateMesh} (M, -I_s, 0, 0, I_s, 50, 50)$

Constant speed  $N_m := \text{CreateMesh} (N_{rpm}, -I_s, 0, 0, 2, I_s, 50, 50)$



$M_m, I_m, N_m$

## MAPEJAT DEL PARELL PER L'EXTRACCIÓ DE LES CARACTERÍSTIQUES DEL MOTOR:

Number of Id current points	$N_{Id} := 250$
Number of Iq current points	$N_{Iq} := 250$
Id current points enumeration	$i := 0, 1.. N_{Id}$
Iq current points enumeration	$j := 0, 1.. N_{Iq}$
Id current values	$x_i := \frac{i}{N_{Id}} \cdot I_s$
Iq current values	$y_j := \frac{j}{N_{Iq}} \cdot I_s$
Flux_d values	$Fd_{i,j} := f_d(x_i, y_j)$
Flux_q values	$Fq_{i,j} := f_q(x_i, y_j)$
Torque	$m_{i,j} := 3 \cdot \frac{p}{2} \cdot (Fd_{i,j} \cdot y_j - Fq_{i,j} \cdot x_i)$
Phase current peak	$I_{s,i,j} := \sqrt{(x_i)^2 + (y_j)^2}$
Flux module	$v_{i,j} := \sqrt{(Fd_{i,j})^2 + (Fq_{i,j})^2}$

Optimum torque for whole speed range calculation:

```

FuctionOutput(n) :=
  Mmax ← 0
  for a ∈ 0, 1..NId
    for b ∈ 0, 1..NIq
      mm ← ma,b
      I ← Isa,b
      U ← p ·  $\frac{n}{60}$  · 2 · π · va,b
       $\begin{pmatrix} IdMmax \\ IqMmax \\ Mmax \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} \frac{a}{N_{Id}} \cdot I_s \\ \frac{b}{N_{Iq}} \cdot I_s \\ mm \end{pmatrix}$  if (mm ≥ Mmax) ∧ (I ≤ Is) ∧ (U ≤ Un)
   $\begin{pmatrix} IdMmax \\ IqMmax \\ Mmax \end{pmatrix}$ 

```

#### PARELL AMB ALIMENTACIÓ MTPA:

$$I_d(N_{mec}) := (FuctionOutput(N_{mec}))_{0,0}$$

$$I_q(N_{mec}) := (FuctionOutput(N_{mec}))_{1,0}$$

$$I(N_{mec}) := \sqrt{I_d(N_{mec})^2 + I_q(N_{mec})^2}$$

$$\omega_n(N_{mec}) := \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot N_{mec}}{60}$$

#### PÈRDUES EN FUNCIÓ DE LA VELOCITAT:

Interpolació pèrdues mecàniques+magnètiques  
a partir del motor NIDEC S102F 53

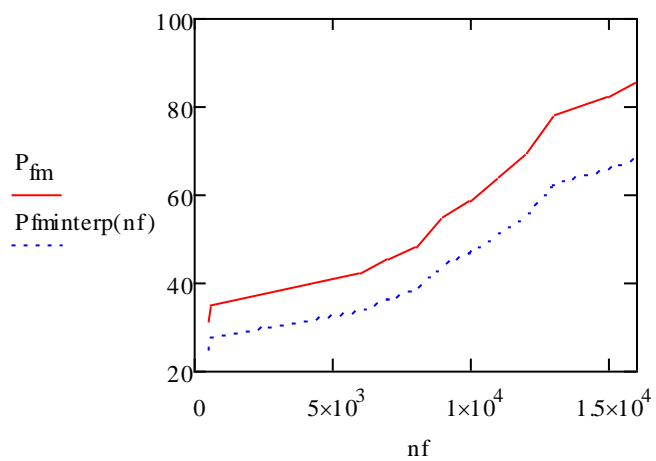


\*Es suposarà un 80% d'aquestes pèrdues per calcular la màquina.

$P_{fm} :=$	$nf :=$
31.2	500
34.9	600
42.3	6000
45.4	7000
48.4	8000
54.9	9000
58.6	10000
64.15	11000
69.5	12000
78.2	13000
82.5	15000
85.5	16000

$parfm := lspline(nf, P_{fm})$

$P_{fm}interp(x) := 0.8interp(parfm, nf, P_{fm}, x)$



EXPERSSIÓ DE LES CORBES CARACTERÍSTIQUES:

Phase rms current: 
$$I_{\text{rms}}(I_d, I_q) := \sqrt{\left(\frac{I_d}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_q}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Output power: 
$$P_{\text{out}}(I_d, I_q, N_{\text{mec}}) := M(I_d, I_q) \cdot \frac{\omega_n(N_{\text{mec}})}{p}$$

Core losses: 
$$P_{\text{Fe}}(N_{\text{mec}}) := P_{\text{finiinterp}}(N_{\text{mec}})$$

Mechanical losses: 
$$P_{\text{mec}} := 0$$

Input power: 
$$P_{\text{in}}(I_d, I_q, N_{\text{mec}}) := P_{\text{out}}(I_d, I_q, N_{\text{mec}}) + 3 \cdot R_s \cdot I_{\text{rms}}(I_d, I_q)^2 + P_{\text{Fe}}(N_{\text{mec}})$$

Efficiency: 
$$\eta(I_d, I_q, N_{\text{mec}}) := \frac{P_{\text{out}}(I_d, I_q, N_{\text{mec}}) - P_{\text{mec}}}{P_{\text{in}}(I_d, I_q, N_{\text{mec}})}$$

Voltage 
$$\text{Vol}(I_d, I_q, N_{\text{mec}}) := V_{\text{ph}}(I_d, I_q, \omega_n(N_{\text{mec}}))$$

Power factor: 
$$\text{PF}(I_d, I_q, N_{\text{mec}}) := \frac{P_{\text{out}}(I_d, I_q, N_{\text{mec}})}{3 \cdot \frac{\text{Vol}(I_d, I_q, N_{\text{mec}})}{\sqrt{2}} \cdot I_{\text{rms}}(I_d, I_q)}$$

Torque constant  $K_T$  
$$K_{T\_peak}(N_{\text{mec}}) := \frac{M(I_d(N_{\text{mec}}), I_q(N_{\text{mec}}))}{I(N_{\text{mec}})}$$

### CORBES CARACTERÍSTIQUES:

$$N_{\text{sim\_max}} := 6000$$

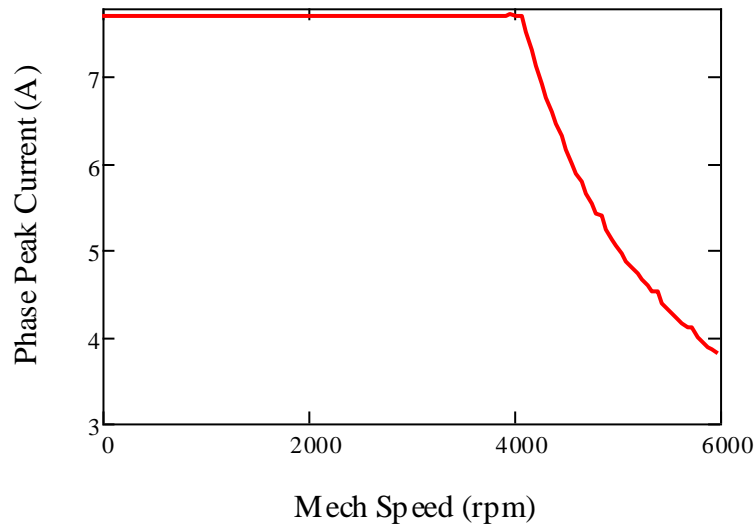
$$N_{\text{scale}} := 50$$

$$N_{\text{mec}} := 1, N_{\text{scale}} \cdot N_{\text{sim\_max}}$$

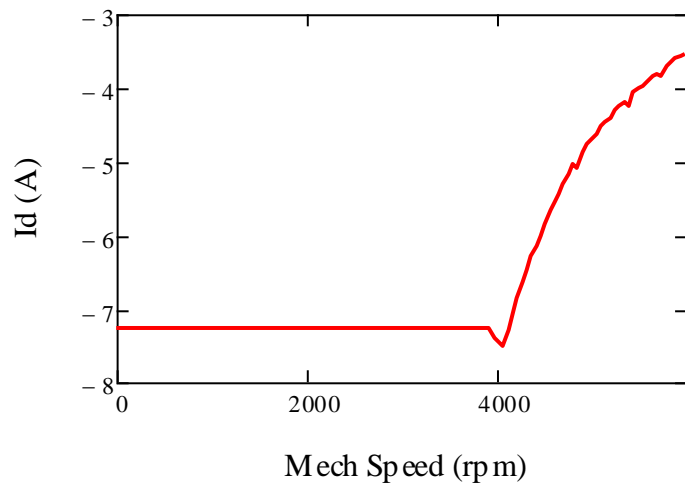
$$\text{Washing speed: } N_{\text{wash}} := 2700$$

$$\text{Spinning speed: } N_{\text{spin}} := 3000$$

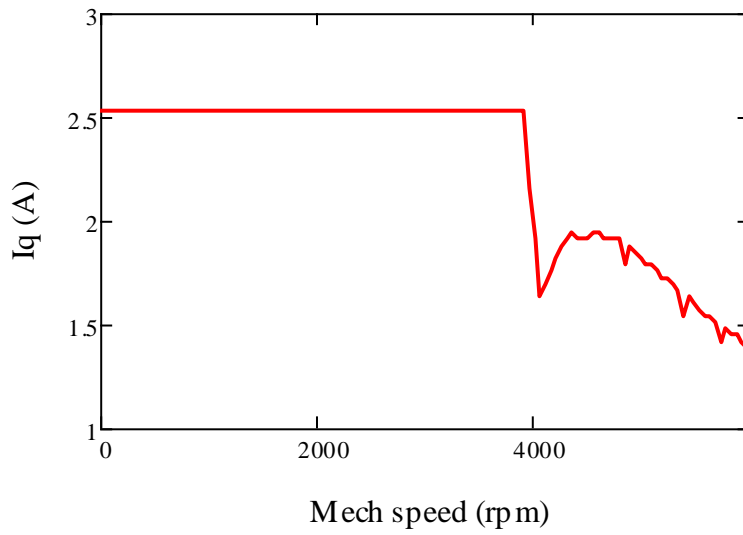
$$I_{\text{wash}} := I(N_{\text{wash}}) = 7.695 \quad I_{\text{spin}} := I(N_{\text{spin}}) = 7.695$$



$$I_{d\_wash} := I_d(N_{\text{wash}}) = -7.269 \quad I_{d\_spin} := I_d(N_{\text{spin}}) = -7.269$$

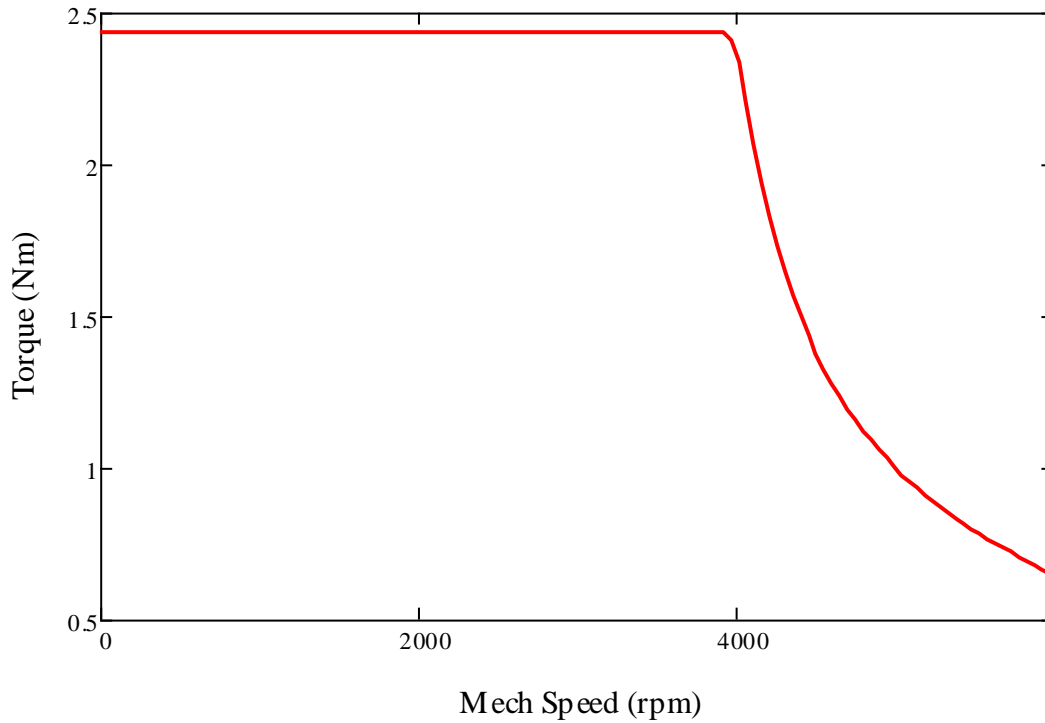


$$I_{q\_wash} := I_q(N_{wash}) = 2.526 \quad I_{q\_spin} := I_q(N_{spin}) = 2.526$$



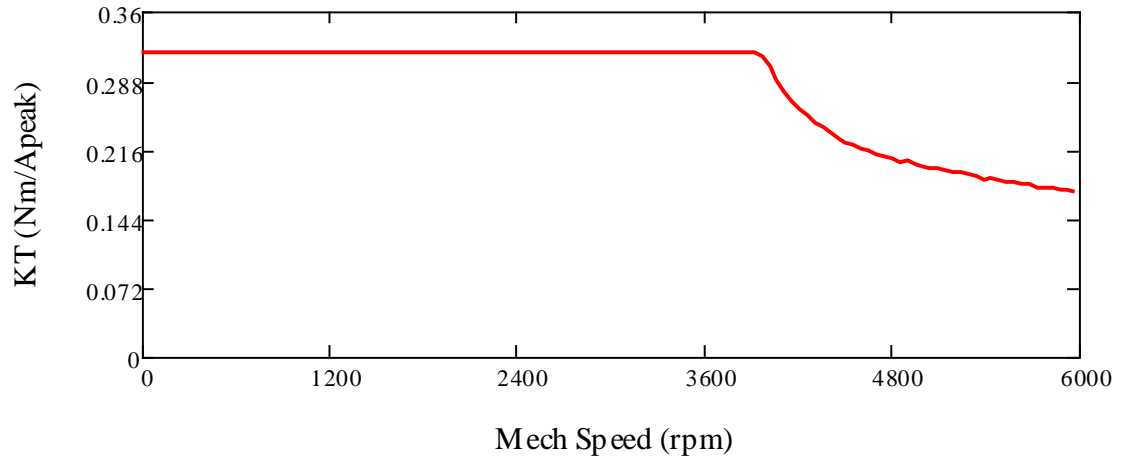
$$M_{wash} := M(I_d(N_{wash}), I_q(N_{wash})) = 2.433$$

$$M_{spin} := M(I_d(N_{spin}), I_q(N_{spin})) = 2.433$$



$$K_{T\_peak\_wash} := K_{T\_peak}(N_{wash}) = 0.316$$

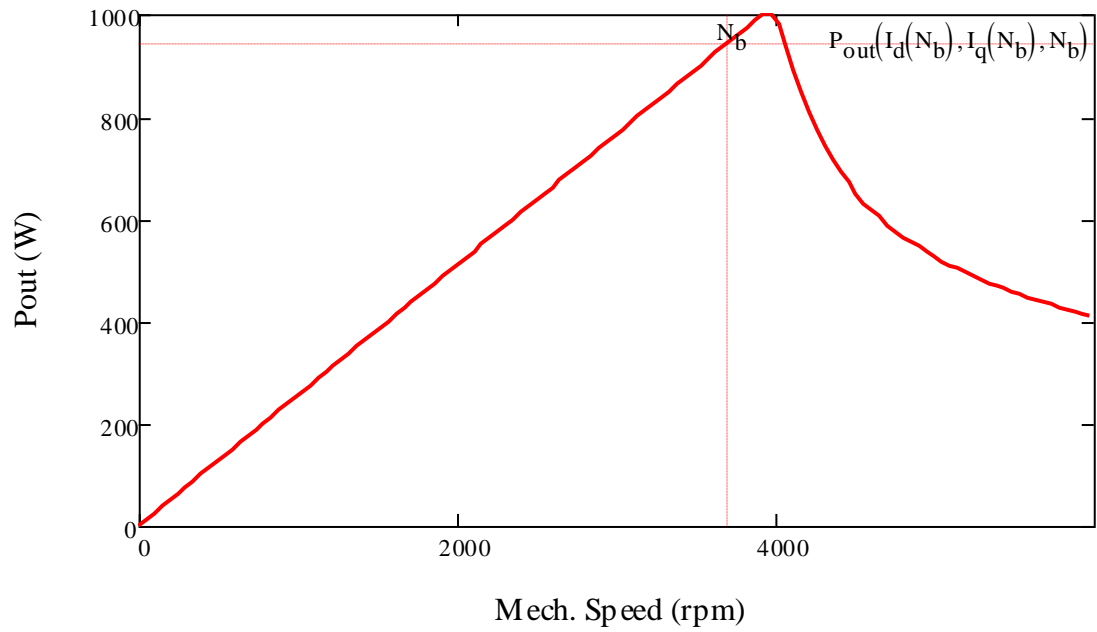
$$K_{T\_peak\_spin} := K_{T\_peak}(N_{spin}) = 0.316$$



$$P_{wash} := P_{out}(I_d(N_{wash}), I_q(N_{wash}), N_{wash}) = 687.814$$

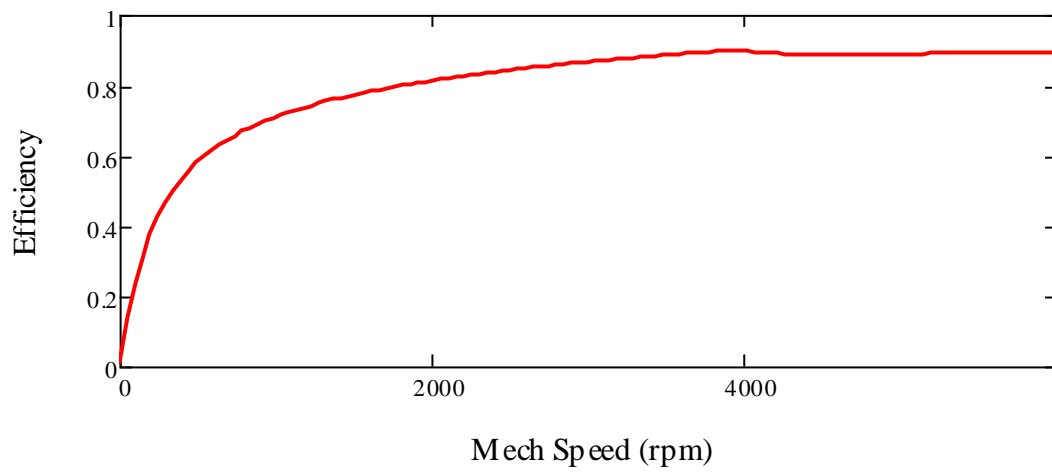
$$P_{spin} := P_{out}(I_d(N_{spin}), I_q(N_{spin}), N_{spin}) = 764.238$$

$$CPSR := 2$$



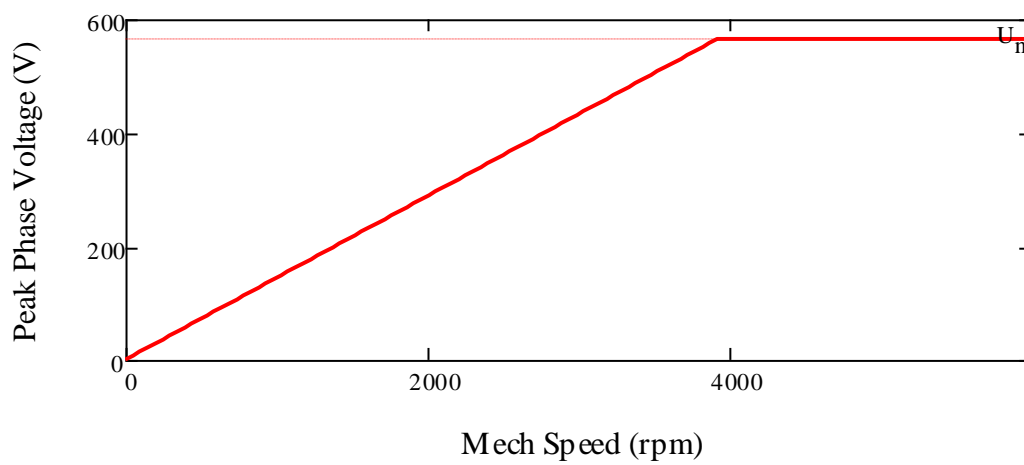
$$\eta_{\text{wash}} := \eta(I_d(N_{\text{wash}}), I_q(N_{\text{wash}}), N_{\text{wash}}) = 0.852$$

$$\eta_{\text{spin}} := \eta(I_d(N_{\text{spin}}), I_q(N_{\text{spin}}), N_{\text{spin}}) = 0.866$$



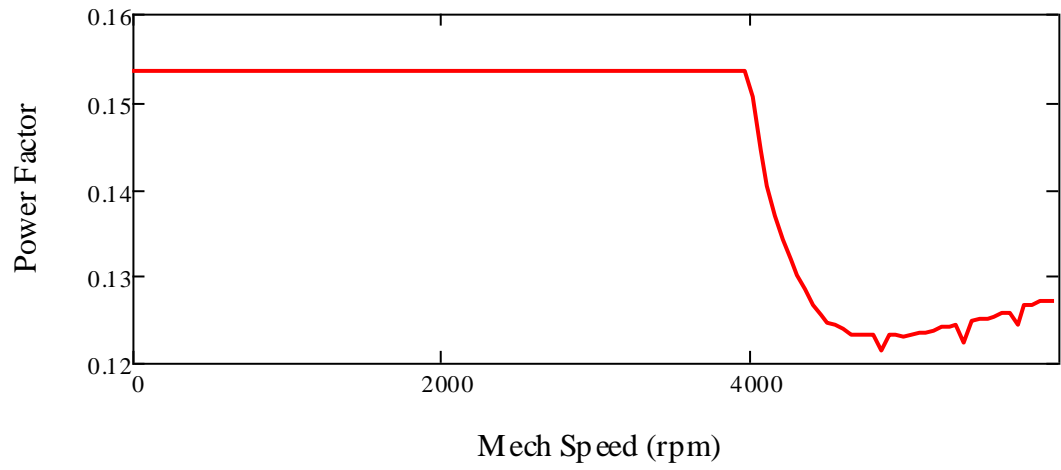
$$U_{\text{wash}} := \text{Vol}(I_d(N_{\text{wash}}), I_q(N_{\text{wash}}), N_{\text{wash}}) = 388.716$$

$$U_{\text{spin}} := \text{Vol}(I_d(N_{\text{spin}}), I_q(N_{\text{spin}}), N_{\text{spin}})$$



$$PF_{\text{wash}} := PF(I_d(N_{\text{wash}}), I_q(N_{\text{wash}}), N_{\text{wash}}) = 0.153$$

$$PF_{\text{spin}} := PF(I_d(N_{\text{spin}}), I_q(N_{\text{spin}}), N_{\text{spin}}) = 0.153$$



### 3. Càlcul de les característiques dels motors de la sèrie.

Per tal de fer un dimensionat inicial de la sèrie es realitzen càlculs inicials de cada una de les màquines que es volen dissenyar. El procés de dimensionat es complementa amb simulacions amb FEMM per tal de comprovar que les característiques obtingudes amb les expressions són viables aplicant elements finits.

#### 1.1. Motor 500 W a 3000 rpm

##### DADES PRINCIPALS:

Potència nominal:

$$P_2 := 500 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 3000 \quad \text{rpm}$$

Parell nominal:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 1.592 \quad \text{Nm}$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 250 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 1.571 \times 10^3$$

Rendiment:



$$\eta := 0.84$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cofi}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\text{max}} = 325.269$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \text{cofi}_n} \quad I_n = 1.783 \quad \text{A}$$

### DIMENSIONS DEL ROTOR:

Ki relació entre valor màxim de la corrent i el seu valor eficaç

Ke relació entre valor màxim i l'eficaç de la tensió

Kp coeficient de forma de la potència

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_i := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5$$

Coeficient de permeabilitat en el buit:

$$\mu_0 := 4 \frac{\pi}{1000000} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Relació Longitud/Diàmetre:

$$K_I := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537$$

Capa de corrent (Entre 3 i 65000 A/m):

$$A_s := 2000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Inducció a l'entreferro:

$$B_e = 0.7 \quad \text{T}$$

Determinació del diàmetre de la màquina:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_I \cdot K_p \cdot K_I \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.069$$

Diàmetre escollit:

$$D_m := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_I \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.027 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat escollida:

$$L_m := 0.05 \quad \text{m}$$

Entreferro:

$$\text{entref} := 0.18 + 0.006 P_2^{0.4} \quad \text{entref} = 0.252$$

Entreferro escollit:

$$g_g := 0.3 \quad \text{mm}$$

CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTATOR:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 3.073 \times 10^3$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 256.106$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$\underline{\underline{Z_r}} := 300 \quad \underline{\underline{Z_r}} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 3.6 \times 10^3$$

SECCIÓ DELS CONDUCTORS:

Densitat de corrent permesa:

$$\Delta := 6 \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Nombre de fils en paral·lel:

$$aa := 1$$

Superfície i diàmetre del conductor:

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.297 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 0.615$$

Diàmetre i superfície del conductor escollit:

$$d_c := 0.63 \quad \text{mm} \quad S_c := aa \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} = 0.312 \quad \text{mm}^2$$

Superfície ocupada pel conductor:

$$s_{\text{ocupada}} := aa \cdot Z_r \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \quad s_{\text{ocupada}} = 93.517 \quad \text{mm}^2$$

Superfície de la ranura:

$$S_r := (117) \cdot 2 \quad \text{mm}^2$$

Factor d'ocupació (Com a màxim 0,4):

$$F_o := \frac{s_{\text{ocupada}}}{S_r} \quad F_o = 0.4$$

## 1.2. Motor 1000 W a 3000 rpm

### DADES PRINCIPALS:

Potència nominal:

$$P_2 := 1000 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 3000 \quad \text{rpm}$$

Parell nomina:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 3.183 \quad \text{Nm}$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 250 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 1.571 \times 10^3$$

Rendiment:

$$\eta := 0.87$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cofi}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\text{max}} = 325.269$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \phi_n} \quad I_n = 3.448 \quad \text{A}$$

#### DIMENSIONS DEL ROTOR:

$K_i$  relació entre valor màxim de la corrent i el seu valor eficaç

$K_e$  relació entre valor màxim i l'eficaç de la tensió

$K_p$  coeficient de forma de la potència

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_i := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5$$

Coeficient de permeabilitat en el buit:

$$\mu_0 := 4 \frac{\pi}{1000000} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Relació Longitud/Diàmetre:

$$K_l := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537$$

Capa de corrent (Entre 20 i 65000 A/m):

$$A_s := 2000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Inducció a l'entreferro:

$$B_e = 0.7 \quad \text{T}$$

Determinació del diàmetre de la màquina:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_l \cdot K_p \cdot K_l \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.086$$

Diàmetre escollit:

$$D_{\text{es}} := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L_{\text{es}} := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_l \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.053 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat escollida:

$$L_{\text{es}} := 0.07 \quad \text{m}$$

Entreferro:

$$\text{entref} := 0.18 + 0.006 P_2^{0.4} \quad \text{entref} = 0.275$$

Entreferro escollit:

$$g_g := 0.3 \quad \text{mm}$$

### CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTATOR:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 1.589 \times 10^3$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 132.443$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$\underline{Z_r} := 200 \quad \underline{Z_t} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 2.4 \times 10^3$$

### SECCIÓ DELS CONDUCTORS:

Densitat de corrent permesa:

$$\Delta := \epsilon \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Nombre de fils en paral·lel:

$$aa := 1$$

Superfície i diàmetre del conductor:



$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.431 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 0.741$$

Diàmetre i superfície del conductor escollit:

$$d_c := 0.75 \text{ mm} \quad S_c := aa \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} = 0.442 \text{ mm}^2$$

Superfície ocupada pel conductor:

$$s_{ocupada} := aa \cdot Z_T \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \quad s_{ocupada} = 88.357 \text{ mm}^2$$

Superfície de la ranura:

$$S_T := (117) \cdot 2 \text{ mm}^2$$

Factor d'ocupació (Com a màxim 0,4):

$$F_o := \frac{s_{ocupada}}{S_T} \quad F_o = 0.378$$

### 1.3. Motor 1500 W a 3000 rpm

#### DADES PRINCIPALS:

Potència nominal:

$$P_2 := 1500 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 3000 \quad \text{rpm}$$

Parell nomina:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 4.775 \quad \text{Nm}$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 250 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 1.571 \times 10^3$$

Rendiment:

$$\eta := 0.88$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cof}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\text{max}} = 325.269$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \phi_n} \quad I_n = 5.09 \quad \text{A}$$

#### DIMENSIONS DEL ROTOR:

K<sub>i</sub> relació entre valor màxim de la corrent i el seu valor eficaç

K<sub>e</sub> relació entre valor màxim i l'eficaç de la tensió

K<sub>p</sub> coeficient de forma de la potència

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_i := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5$$

Coeficient de permeabilitat en el buit:

$$\mu_0 := 4 \frac{\pi}{1000000} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Relació Longitud/Diàmetre:

$$K_I := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537$$

Capa de corrent (Entre 20 i 65000 A/m):

$$A_s := 20000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Inducció a l'entreferro:

$$B_e = 0.7 \quad \text{T}$$

Determinació del diàmetre de la màquina:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_I \cdot K_p \cdot K_I \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.098$$

Diàmetre escollit:

$$D_m := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_I \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.078 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat escollida:

$$L_m := 0.12 \quad \text{m}$$

Entreferro:

$$\text{entref} := 0.18 + 0.006 P_2^{0.4} \quad \text{entref} = 0.292$$

Entreferro escollit:

$$g_g := 0.3 \quad \text{mm}$$

#### CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTATOR:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 1.075 \times 10^3$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 89.597$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$\underline{Z_t} := 180 \quad \underline{Z_r} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 2.16 \times 10^3$$

#### SECCIÓ DELS CONDUCTORS:

Densitat de corrent permesa:

$$\Delta := 10 \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Nombre de fils en paral·lel:

$$aa := 1$$

Superfície i diàmetre del conductor:

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.431 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 0.741$$

Diàmetre i superfície del conductor escollit:

$$d_c := 0.8 \text{ mm} \quad S_c := aa \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} = 0.503 \text{ mm}^2$$

Superfície ocupada pel conductor:

$$s_{ocupada} := aa \cdot Z_r \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \quad s_{ocupada} = 90.478 \text{ mm}^2$$

Superfície de la ranura:

$$S_r := (117) \cdot 2 \text{ mm}^2$$

Factor d'ocupació (Com a màxim 0,4):

$$F_o := \frac{s_{ocupada}}{S_r} \quad F_o = 0.387$$

## 1.4. Motor 2200 W a 3000 rpm

### DADES PRINCIPALS:

Potència nominal:

$$P_2 := 2200 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 3000 \quad \text{rpm}$$

Parell nomina:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 7.003 \quad \text{Nm}$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 250 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 1.571 \times 10^3$$

Rendiment:

$$\eta := 0.90$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\cos \phi_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\text{max}} = 325.269$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \text{cofi}_n} \quad I_n = 7.358 \quad \text{A}$$

#### DIMENSIONS DEL ROTOR:

$K_i$  relació entre valor màxim de la corrent i el seu valor eficaç

$K_e$  relació entre valor màxim i l'eficaç de la tensió

$K_p$  coeficient de forma de la potència

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_i := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5$$

Coeficient de permeabilitat en el buit:

$$\mu_0 := 4 \frac{\pi}{1000000} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$



Relació Longitud/Diàmetre:

$$K_l := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537$$

Capa de corrent (Entre 20 i 65000 A/m):

$$A_s := 2000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Inducció a l'entreferro:

$$B_e = 0.7 \quad \text{T}$$

Determinació del diàmetre de la màquina:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_l \cdot K_p \cdot K_l \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.111$$

Diàmetre escollit:

$$D_e := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_l \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.112$$

Longitud de l'empilat escollida:

$$L := 0.13 \quad \text{m}$$

Entreferro:

$$\text{entref} := 0.18 + 0.006 P_2^{0.4} \quad \text{entref} = 0.31$$

Entreferro escollit:

$$g_g := 0.3 \quad \text{mm}$$

### CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTATOR:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 744.707$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 62.059$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$\underline{Z_{tr}} := 110 \quad \underline{Z_{tr}} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 1.32 \times 10^3$$

### SECCIÓ DELS CONDUCTORS:

Densitat de corrent permesa:

$$\Delta := 9 \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Nombre de fils en paral·lel:

$$aa := 1$$

Superfície i diàmetre del conductor:

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.818 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 1.02 \quad \text{mn}$$

Diàmetre i superfície del

conductor escollit:

$$d_c := 1 \quad \text{mn} \quad S_c := aa \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} = 0.785 \quad \text{mm}^2$$

Superfície ocupada pel conductor:

$$s_{ocupada} := aa \cdot Z_T \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \quad s_{ocupada} = 86.394 \quad \text{mm}^2$$

Superfície de la ranura:

$$S_T := (117) \cdot 2 \quad \text{mm}^2$$

Factor d'ocupació (Com a màxim 0,4):

$$F_o := \frac{s_{ocupada}}{S_T} \quad F_o = 0.369$$

## 1.5. Motor 500 W a 1500 rpm

### DADES PRINCIPALS:

Potència nominal:

$$P_2 := 500 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 1500 \quad \text{rpm}$$

Parell nomina:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 3.183 \quad \text{Nm}$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 125 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 785.398$$

Rendiment:

$$\eta := 0.84$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cofi}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\text{max}} = 325.269$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \text{cofi}_n} \quad I_n = 1.783 \quad \text{A}$$

#### DIMENSIONS DEL ROTOR:

Ki relació entre valor màxim de la corrent i el seu valor eficaç

Ke relació entre valor màxim i l'eficaç de la tensió

Kp coeficient de forma de la potència

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_i := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5$$

Coeficient de permeabilitat en el buit:

$$\mu_0 := 4 \frac{\pi}{1000000} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Relació Longitud/Diàmetre:

$$K_l := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537$$

Capa de corrent (Entre 20 i 65000 A/m):

$$A_s := 2000 \left( \frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

Inducció a l'entreferro:

$$B_e = 0.7 \quad \text{T}$$

Determinació del diàmetre de la màquina:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_i \cdot K_p \cdot K_l \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.087$$

Diàmetre escollit:

$$D_m := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_i \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.054 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat escollida:

$$L_m := 0.07 \quad \text{m}$$

Entreferro:

$$\text{entref} := 0.18 + 0.006 P_2^{0.4} \quad \text{entref} = 0.252$$

Entreferro escollit:

$$g_g := 0.3 \quad \text{mm}$$

### CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTATOR:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 3.073 \times 10^3$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 256.106$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$Z_{\text{tot}} := 200 \quad Z_{\text{tot}} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 2.4 \times 10^3$$

### SECCIÓ DELS CONDUCTORS:

Densitat de corrent permesa:

$$\Delta := \epsilon \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Nombre de fils en paral·lel:

$$aa := 1$$

Superfície i diàmetre del conductor:

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.297 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 0.615$$

Diàmetre i superfície del conductor escollit:

$$d_c := 0.75 \quad \text{mm} \quad S_c := aa \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} = 0.442$$

Superfície ocupada pel conductor:

$$s_{ocupada} := aa \cdot Z_r \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \quad s_{ocupada} = 88.357 \quad \text{mm}^2$$

Superfície de la ranura:

$$S_r := (117) \cdot 2 \quad \text{mm}^2$$

Factor d'ocupació (Com a màxim 0,4):

$$F_o := \frac{s_{ocupada}}{S_r} \quad F_o = 0.378$$



## 1.6. Motor 750 W a 1500 rpm

### DADES PRINCIPALS:

Potència nominal:

$$P_2 := 750 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 1500 \quad \text{rpm}$$

Parell nomina:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 4.775 \quad \text{Nm}$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 125 \quad \text{Hz} \quad \Omega_n := 2 \cdot \pi \cdot f_s = 785.398$$

Rendiment:

$$\eta := 0.86$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cofi}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\max} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\max} = 325.269$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \phi_n} \quad I_n = 2.622 \quad \text{A}$$

### DIMENSIONS DEL ROTOR:

Ki relació entre valor màxim de la corrent i el seu valor eficaç

Ke relació entre valor màxim i l'eficaç de la tensió

Kp coeficient de forma de la potència

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_i := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5$$

Coeficient de permeabilitat en el buit:

$$\mu_0 := 4 \frac{\pi}{1000000} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Relació Longitud/Diàmetre:

$$K_l := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537$$

Capa de corrent (Entre 20 i 65000 A/m):

$$A_s := 2000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Inducció a l'entreferro:

$$B_e = 0.7 \quad \text{T}$$

Determinació del diàmetre de la màquina:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_l \cdot K_p \cdot K_l \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.099$$

Diàmetre escollit:

$$D_{\text{es}} := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_l \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.08 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat escollida:

$$L_{\text{es}} := 0.12 \quad \text{m}$$

Entreferro:

$$\text{entref} := 0.18 + 0.006 P_2^{0.4} \quad \text{entref} = 0.265$$

Entreferro escollit:

$$g_g := 0.3 \quad \text{mm}$$

### CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTATOR:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 2.09 \times 10^3$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 174.168$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$\underline{Z_r} := 300 \quad \underline{Z_t} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 3.6 \times 10^3$$

### SECCIÓ DELS CONDUCTORS:

Densitat de corrent permesa:

$$\Delta := 8 \quad \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Nombre de fils en paral·lel:

$$aa := 1$$

Superfície i diàmetre del conductor:

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.328 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 0.646 \quad \text{mn} \quad d_c = 0.646$$

Diàmetre i superfície del conductor escollit:

$$d_c := 0.63 \quad \text{mn} \quad S_c := aa \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} = 0.312 \quad \text{mm}^2$$

Superfície ocupada pel conductor:

$$s_{ocupada} := aa \cdot Z_T \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \quad s_{ocupada} = 93.517$$

Superfície de la ranura:

$$S_T := (117) \cdot 2 \quad \text{mm}^2$$

Factor d'ocupació (Com a màxim 0,4):

$$F_O := \frac{s_{ocupada}}{S_T} \quad F_O = 0.4$$

## 1.7. Motor 1000 W a 1500 rpm

### DADES PRINCIPALS:

Potència nominal:

$$P_2 := 1000 \quad \text{W}$$

Velocitat nominal:

$$N_N := 1500 \quad \text{rpm}$$

Parell nomina:

$$M_n := \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_N}{60}} \quad M_n = 6.366 \quad \text{Nm}$$

Parells de pols:

$$p := 5$$

Freqüència:

$$f_s := p \cdot \frac{N_N}{60} \quad f_s = 125 \quad \text{Hz}$$

Rendiment:

$$\eta := 0.87$$

Nombre de fases:

$$m := 3$$

Factor de potència nominal:

$$\text{cofi}_n := 0.85$$

Voltatge nominal del rectificador monofàsic

$$U_{\text{red}} := 230 \quad \text{V}$$

Tensió eficaç:

$$U_{\text{max}} := \sqrt{2} \cdot U_{\text{red}} \quad U_{\text{max}} = 325.269$$

Tensió de fase nominal:

$$U_n := 130 \quad \text{V}$$

Corrent de fase nominal:

$$I_n := \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \text{cofi}_n} \quad I_n = 3.448 \quad \text{A}$$

#### DIMENSIONS DEL ROTOR:

Ki relació entre valor màxim de la corrent i el seu valor eficaç

Ke relació entre valor màxim i l'eficaç de la tensió

Kp coeficient de forma de la potència

$$K_e := \sqrt{2} \quad K_i := \sqrt{2} \quad K_p := 0.5$$

Coeficient de permeabilitat en el buit:

$$\mu_0 := 4 \frac{\pi}{1000000} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Relació Longitud/Diàmetre:

$$K_I := \frac{\pi \cdot p \left( \frac{-2}{3} \right)}{2} = 0.537$$

Capa de corrent (Entre 20 i 65000 A/m):

$$A_s := 20000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Inducció a l'entreferro:

$$B_e = 0.7 \quad \text{T}$$

Determinació del diàmetre de la màquina:

$$D_e := \sqrt[3]{2 \cdot p \cdot \frac{P_2}{\pi \cdot m \cdot A_s \cdot K_e \cdot K_I \cdot K_p \cdot K_I \cdot \eta \cdot B_e \cdot f_s}} = 0.109$$

Diàmetre escollit:

$$D_e := 0.0811 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat:

$$L := \frac{2 \cdot p \cdot P_2}{\eta \cdot m \cdot K_p \cdot K_e \cdot B_e \cdot f_s \cdot D_e^2 \cdot K_I \cdot A_s \cdot \pi} \quad L = 0.105 \quad \text{m}$$

Longitud de l'empilat escollida:

$$L := 0.12 \quad \text{m}$$

Entreferro:

$$\text{entref} := 0.18 + 0.006 P_2^{0.4} \quad \text{entref} = 0.275$$

Entreferro escollit:



$$g_g := 0.3 \quad \text{mm}$$

### CARACTERÍSTIQUES DE L'ESTATOR:

Nombre de ranures:

$$Q := 12 \quad \text{ranures}$$

Factor de Bobinat (Extret de Koil):

$$k_w := 0.93$$

Número total de conductors:

$$Z_t := \pi \cdot D_e \cdot \frac{A_s}{I_n \cdot k_w} \quad Z_t = 1.589 \times 10^3$$

Número de conductors per ranura:

$$Z_r := \frac{Z_t}{Q} \quad Z_r = 132.443$$

Número de conductors totals i per ranura escollit:

$$\underline{\underline{Z_r}} := 230 \quad \underline{\underline{Z_r}} := Z_r \cdot Q \quad Z_t = 2.76 \times 10^3$$

SECCIÓ DELS CONDUCTORS:

Densitat de corrent permesa:

$$\Delta := 9 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Nombre de fils en paral·lel:

$$aa := 1$$

Superfície i diàmetre del conductor:

$$s_c := \frac{I_n}{aa \cdot \Delta} = 0.383 \quad d_c := \sqrt{4 \cdot \frac{s_c}{\pi}} = 0.698$$

Diàmetre i superfície del conductor escollit:

$$d_c := 0.71 \text{ mm} \quad S_c := aa \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} = 0.396 \text{ mm}^2$$

Superfície ocupada pel conductor:

$$s_{ocupada} := aa \cdot Z_r \cdot \pi \cdot \frac{d_c^2}{4} \quad s_{ocupada} = 91.061 \text{ mm}^2$$

Superfície de la ranura:

$$S_r := (117) \cdot 2 \text{ mm}^2$$

Factor d'ocupació (Com a màxim 0,4):

$$F_o := \frac{s_{ocupada}}{S_r} \quad F_o = 0.389$$

## **Annex B CÀLCUL DE PÈRDUES MAGNETIQUES (MODEL DE BERTOTTI)**

En aquest document es mostrarà el mètode emprat per al càlcul de les pèrdues del ferro. Concretament es realitzarà una breu explicació de la metodologia i s'enunciaran les fórmules utilitzades al codi LUA de càlcul de pèrdues.

## Base teòrica per al càlcul de pèrdues.

Pel que fa al càlcul de les pèrdues produïdes al ferro s'haurà de tenir en compte que es contemplen tres fenòmens que les produeixen:

- Histèresis magnètica.
- Corrents de Foucault.
- Addicionals.

El model de Bertotti parteix de la fórmula principal que contempla totes les pèrdues mencionades:

$$P_{fe} = p_h + p_d = p_h + p_c + p_e$$

On :

**P<sub>h</sub>**: Són les pèrdues per histèresis proporcionals al cicle d'histèresis.

**P<sub>d</sub>**: Són les pèrdues dinàmiques degudes a la variació del camp, podent-se separar en:

**P<sub>c</sub>**: Pèrdues clàssiques (corrents de Foucault) proporcionals al gruix de planxa i conductivitat del material.

**P<sub>e</sub>**: Pèrdues en excés relacionades amb la presència de dominis magnètics.

L'equació principal es desenvolupa i pel cas particular d'ones de caràcter sinusoidal s'arriba a l'expressió:

$$P_{fe} = p_h(f) + \left( \frac{\sigma \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot f^2}{6} \right) \cdot B_1^2 + 8.67 \cdot c_a \cdot (f \cdot B_1)^{\frac{3}{2}}$$

Que a la pràctica i per l'ús amb programes d'Elements Finites s'utilitza una aproximació tal:

$$P_{fe} = K_h \cdot f \cdot B_1^2 + K_c \cdot (f \cdot B_1)^2 + K_a \cdot (f \cdot B_1)^{\frac{3}{2}}$$

On:

**K<sub>h</sub>**: És una constant que ve definida per:

$$K_c = \left( \frac{\sigma \cdot \pi^2 \cdot d^2}{6} \right)$$

**K<sub>c</sub>** i **K<sub>a</sub>**: Vindran definides pel fabricant de la xapa d'acer.

**f**: És la freqüència elèctrica amb que s'alimenta la màquina.

**B**: És la inducció al ferro.

## OBTENCIÓ DELS COEFICIENTS K

El mètode utilitzat per a l'obtenció dels coeficients k de l'equació de determinació de les pèrdues serà a partir de la utilització del SOLVER del full de càlcul de l'EXCEL.

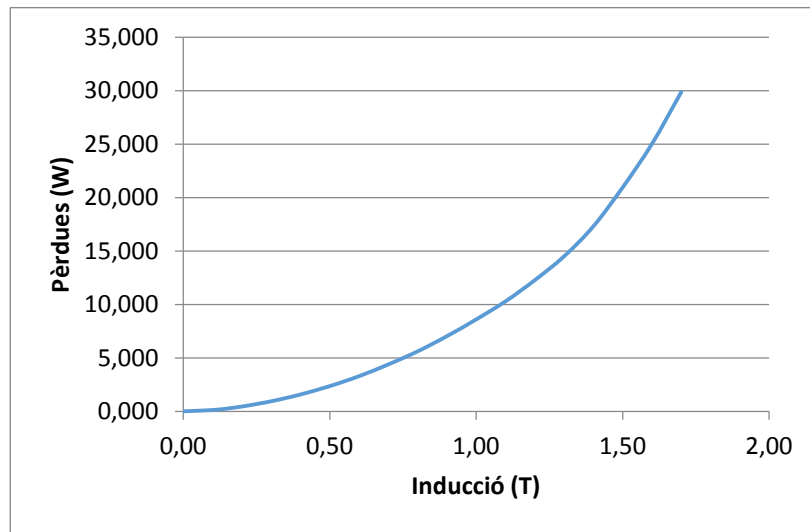
Els fabricants de xapes d'acer donen les característiques magnètiques del material en forma de taules.

B(Gauss)	W/kg
0	0,000
1000	0,122
1500	0,264
2000	0,450
2500	0,682
3000	0,940
3500	1,242
4000	1,577
5000	2,358
6000	3,290
7000	4,390
8000	5,610
9000	7,030
10000	8,600
11000	10,290
12000	12,270
13000	14,500
14000	17,310
15000	20,950
16000	25,020
17000	29,860

**Taula 0.1.** Pèrdues produïdes al ferro en funció de la inducció (proporcionada pel fabricant).

Com s'observa aquestes pèrdues van en funció de la massa de ferro de la màquina elèctrica.

Expressant els valors de la taula en una gràfica:



**Figura 0.1.** Gràfica de les pèrdues al Ferro en funció de la inducció (amb les dades del fabricant) (Font: Pròpia)

Un cop ja s'ha obtingut la gràfica i suposant-se que la línia polinòmica ve donada per l'expressió de Bertotti mostrada a l'apartat 1 es crearan les dues columnes per usar el SOLVER.

A la primera s'introduirà la expressió de Bertotti tenint com a variables els coeficients k.

SUMA				= \$D\$2*\$B\$7*C11*C11+\$D\$3*(\$B\$7*C11)^2+\$D\$4*(\$B\$7*C11)^(3/2)				
	A	B	C	D	E	F	G	H
1				W/kg	W/m^3			
2			Kh	0,00042844	3,256			
3			Kc	0,00023323	1,773			
4			Ka	0,0000000	0,000			
5								
6		7600						
7	f	200	0,02					
8					15,3856892			
9	B(Gauss)	W/kg	B(T)	Pfe	error			
10	0	0,000	0,00	0	0			
11	1000	0,122	0,10	= \$D\$2*\$B\$7	0,00077558			
12	1500	0,264	0,15	0,2118390	0,00272077			
13	2000	0,450	0,20	0,3766027	0,00538716			
14	2500	0,682	0,25	0,5884417	0,00875315			
15	3000	0,940	0,30	0,8473561	0,0085829			
16	3500	1,242	0,35	1,1533458	0,00785957			
17	4000	1,577	0,40	1,5064108	0,00498284			
18	5000	2,358	0,50	2,3537669	1,7919E-05			
19	6000	3,290	0,60	3,3894243	0,00988519			
20	7000	4,390	0,70	4,6133830	0,04989998			
21	8000	5,610	0,80	6,0256432	0,17275923			
22	9000	7,030	0,90	7,6262046	0,35545995			
23	10000	8,600	1,00	9,4150674	0,66433492			
24	11000	10,290	1,10	11,3922316	1,21491449			
25	12000	12,270	1,20	13,5576971	1,65816383			
26	13000	14,500	1,30	15,9114640	1,99223052			
27	14000	17,310	1,40	18,4535322	1,30766582			
28	15000	20,950	1,50	21,1839017	0,05471002			
29	16000	25,020	1,60	24,1025726	0,84167298			
30	17000	29,860	1,70	27,2095449	7,02491233			

**Figura 0.2.** Captura de pantalla de l'EXCEL, Requisits previs a l'ús del SOLVER (Font: Pròpia)

A la segona es calcularà l'error quadràtic, es dir: La resta entre les pèrdues indicades pel fabricant i les pèrdues calculades amb Bertotti elevada al quadrat. Finalment es farà la suma de tots els errors quadràtics.

Obrint-se la funcionalitat SOLVER del full de càlcul:

	A	B	C	D	E	F	G
1				W/kg	W/m^3		
2			Kh	0,00042844	3,256		
3			Kc	0,00023323	1,773		
4			Ka	0,00000000	0,000		
5							
6		7600					
7	f	200	0,02				
8					15,3856892		
9	B(Gauss)	W/kg	B(T)	Pfe	error		
10	0	0,000	0,00	0	0		
11	1000	0,122	0,10	0,0941507	0,00077558		
12	1500	0,264	0,15	0,2118390	0,00272077		
13	2000	0,450	0,20	0,3766027	0,00538716		
14	2500	0,682	0,25	0,5884417	0,00875315		
15	3000	0,940	0,30	0,8473561	0,0085829		
16	3500	1,242	0,35	1,1533458	0,00785957		
17	4000	1,577	0,40	1,5064108	0,00498284		
18	5000	2,358	0,50	2,3537669	1,7919E-05		
19	6000	3,290	0,60	3,3894243	0,00988519		
20	7000	4,390	0,70	4,6133830	0,04989998		
21	8000	5,610	0,80	6,0256432	0,17275923		
22	9000	7,030	0,90	7,6262046	0,35545995		
23	10000	8,600	1,00	9,4150674	0,66433492		
24	11000	10,290	1,10	11,3922316	1,21491449		
25	12000	12,270	1,20	13,5576971	1,65816383		
26	13000	14,500	1,30	15,9114640	1,99223052		
27	14000	17,310	1,40	18,4535322	1,30766582		
28	15000	20,950	1,50	21,1839017	0,05471002		
29	16000	25,020	1,60	24,1025726	0,84167298		
30	17000	29,860	1,70	27,2095449	7,02491233		

**Parámetros de Solver**

Establecer objetivo:

Para: ☐ Max ☒ Min ☐ Valor de:

Cambiando las celdas de variables:

Sujeto a las restricciones:

☒ Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

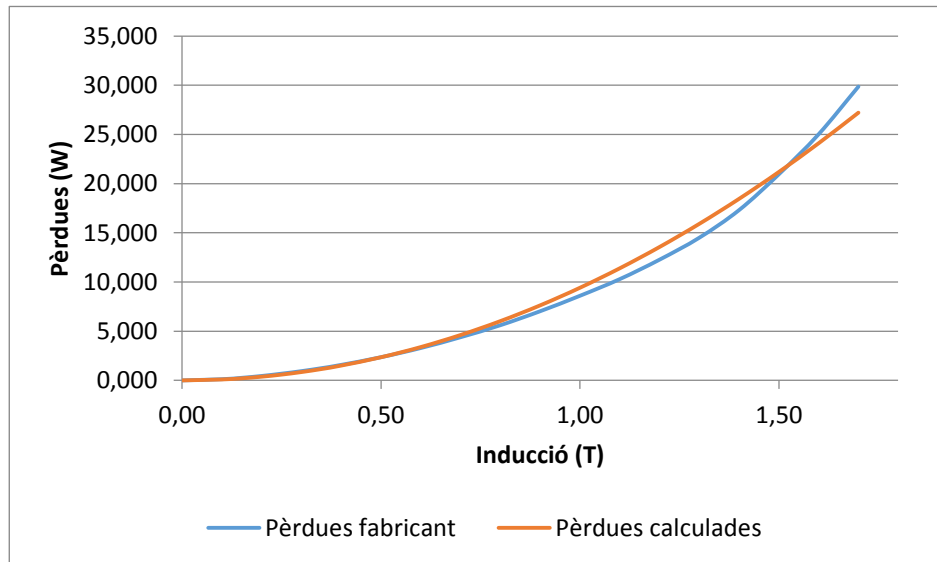
Método de resolución: Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

**Figura 0.3..** Captura de pantalla de l'EXCEL, introducció de criteris al SOLVER (Font: Pròpia)



Es posa com a objectiu minimitzar l'error variant les tres variables, o sigui els coeficients k.

Es resol i s'obté el següent gràfic:



**Figura 0.4.** Gràfica de les pèrdues al Ferro en funció de la inducció (Dades del fabricant vs Càlcul propi)  
(Font: Pròpia)

Els valors que han pres les tres variables són:

	W/m <sup>3</sup>
<b>Kh</b>	3,256
<b>Kc</b>	1,773
<b>Ka</b>	0,000

**Taula 0.2.** Valors del Coeficients K

Un cop ja es tenen simplement s'introduiran al codi LUA per tal de calcular les pèrdues produïdes al ferro de la màquina.

Esmentar que aquest coeficients seran en funció del volum del Ferro, suposant-se una densitat de 7600 kg/m<sup>3</sup> s'han convertit, ja que el resultat donat pel SOLVER eren en funció de la massa.

Aquesta conversió s'ha fet perquè el programa d'elements finits farà els càlculs basant-se en el volum de ferro de les xapes.

**Annex C - OBTENCIÓ D'UNA GEOMETRIA ÒPTIMA  
MITJANÇANT SyR-e**

En aquest annex es descriurà tot el procediment seguit per tal d'obtenir la geometria base del motor tipus en que s'ha basat aquest TFG.

L'abast d'aquest Annex anirà: des de la instal·lació i execució del programa Open Source SyR-e, la introducció de dades per tal d'iniciar la simulació, fins el processament dels resultats fruit de la simulació.

## 1. Descàrrega i instal·lació del software.

El primer pas per a la utilització de l'eina SyR-e serà la seva descàrrega, s'accedeix al web <https://sourceforge.net/projects/syr-e/> i es descarrega el programa.

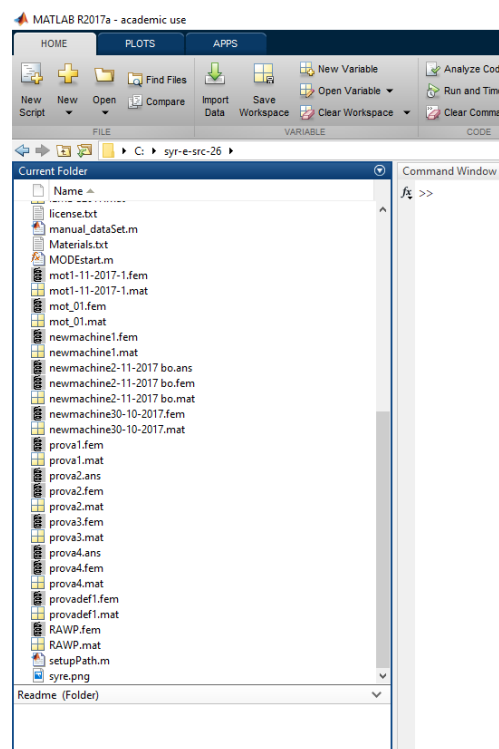
L'altra eina de la que s'haurà de disposar per utilitzar SyR-e serà el programa de simulació per Elements Finites FEMM, també disponible al seu web: <http://www.femm.info>

Un cop descarregats els dos programes serà necessària la seva descompressió.

Per tal d'evitar problemes en la seva utilització es recomana instal·lar el FEMM 4.2 al directori C:\ i copiar la carpeta *syr-e-src-26* al mateix directori on s'ha instal·lat FEMM.

Un cop fets aquests passos es procedirà a obrir el software de càlcul, si bé hi ha dues opcions: *Matlab* o bé *Octave*. Per la realització del present projecte s'ha utilitzat *MATLAB R2017a*

S'obra el Matlab i a la barra de directoris s'accedeix a la carpeta on es troba SyR-e, o sigui: C:\syr-e-src-26.



**Figura 1.1.** Directori de carpetes de Matlab (Font: Pròpia)

Un cop dins el directori s'executa el fitxer *setupPath.m* que es troba cap al final del llistat d'arxius de la barra de l'esquerra.

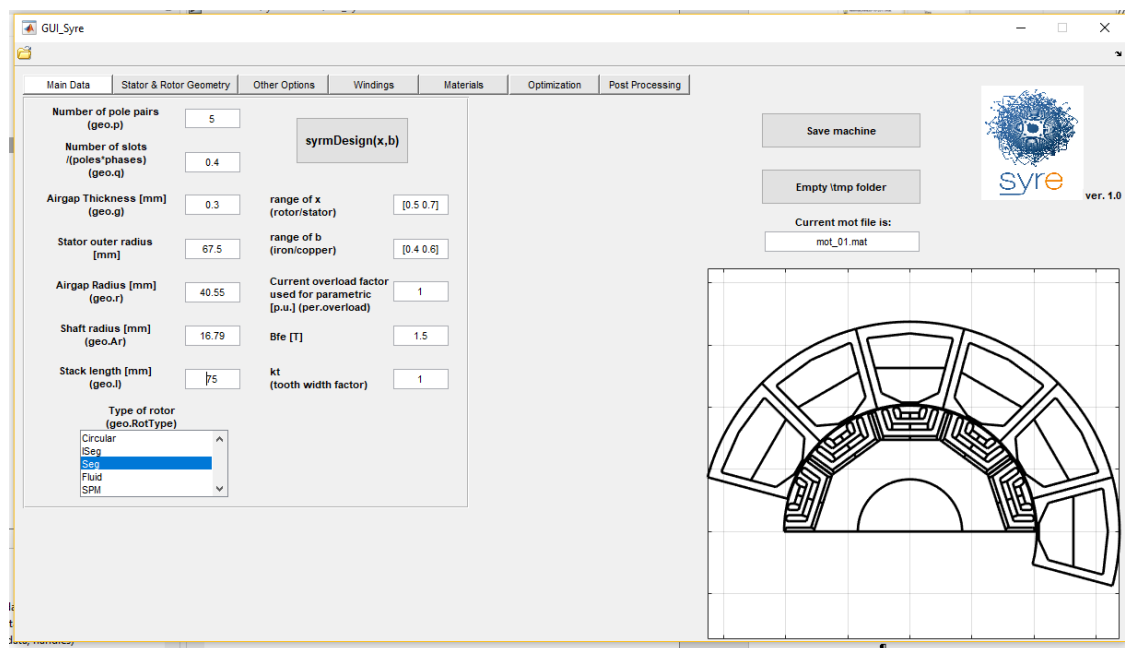
Un cop executat el codi ja s'hauran instal·lat tots els Paths necessaris per executar el software.

El següent arxiu .m a executar serà GUI\_Syre.m, un cop sigui executat s'obrirà una nova finestra, aquesta serà la consola d'utilització del programa.

Un cop ja executat el programa, serà el moment d'introduir les dades inicials del motor a simular i ajustar els paràmetres de simulació.

Com és pot veure a la part superior de la consola de SyR-e s'hi troben múltiples pestanyes on hi ha quadres de text amb valors.

A la primera pestanya de totes **“Main Data”** hi ha les característiques principals del motor (ja mostrades a l'apartat 4.2. de la memòria), les quals s'hauran de definir segons desitgem.



**Figura 1.2.** Consola de SyR-e a l'apartat de “Main Data” (Font: Pròpia)

A continuació es mostra una taula amb tots els valors que hauran de constar en aquesta pestanya.

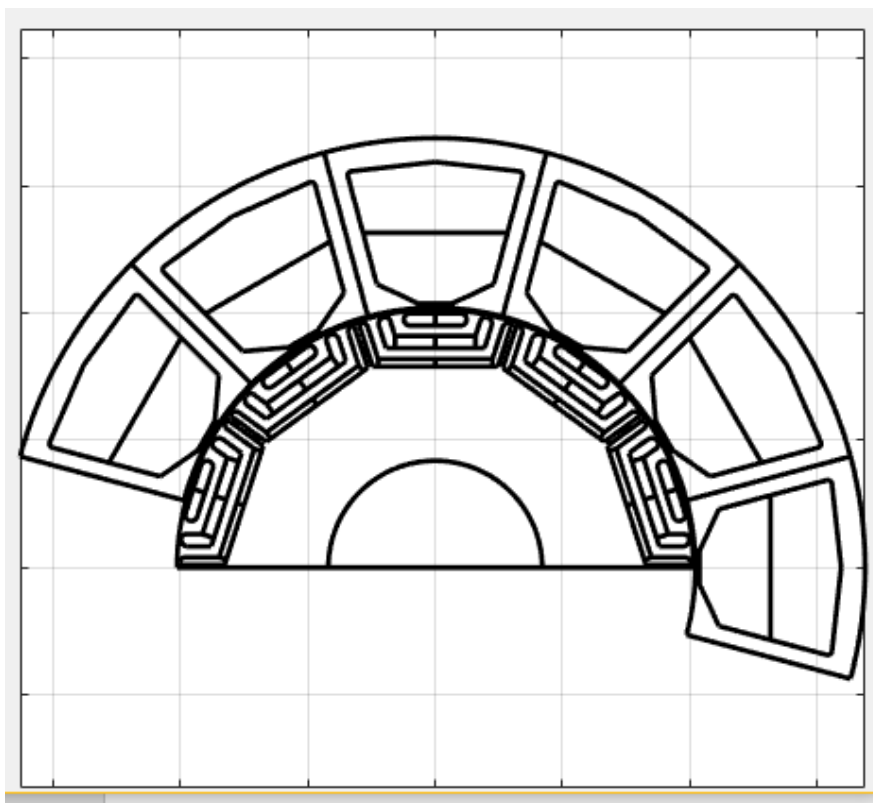
<b>Number of pole pairs</b>	5	<b>Stack length</b>	101
<b>Number of slots/(poles*phases)</b>	0.4	<b>Range of x</b>	[0.5 0.7]
<b>Airgap thickness</b>	0.3	<b>Range of b</b>	[0.4 0.6]
<b>Stator outer radius</b>	67.5	<b>Current overload factor</b>	1

Airgap Radius	<u>44.55</u>	Bfe	<u>1.5</u>
Shaft radius	<u>16.79</u>	Kt	<u>1</u>

Els valors subratllats es deixaran els per defecte (alguns ja s'autocalculen)

Finalment pel que fa a l'apartat Type of rotor, es seleccionarà els tipus **|Seg**

A la finestra de la part inferior a la dreta es mostra com queda inicialment la geometria del motor.



**Figura 1.3.** Finestra gràfica de la consola de SyR-e (Font: Pròpia)

Com s'observa només es dibuixa la meitat del motor, aquest fet es per reduir el temps que dura cada simulació del FEMM.

La següent pestanya a complementar serà “**Stator & Rotor Geometry**”

**Figura 1.4.** Consola de SyR-e a l’apartat de”Stator & Rotor Geometry (Font: Pròpia)

En aquesta pestanya es deixaran el valors per defecte que ja proporciona el programa

A continuació s'obra la pestanya **"Other Options"**. Unicament es canviarà el valor "Copper Loss" (35 W) així obtenint-se un corrent nominal d'uns 9 A .

**Figura 1.5.** Consola de SyR-e a l'apartat d'"Other Options" (Font: Pròpia)

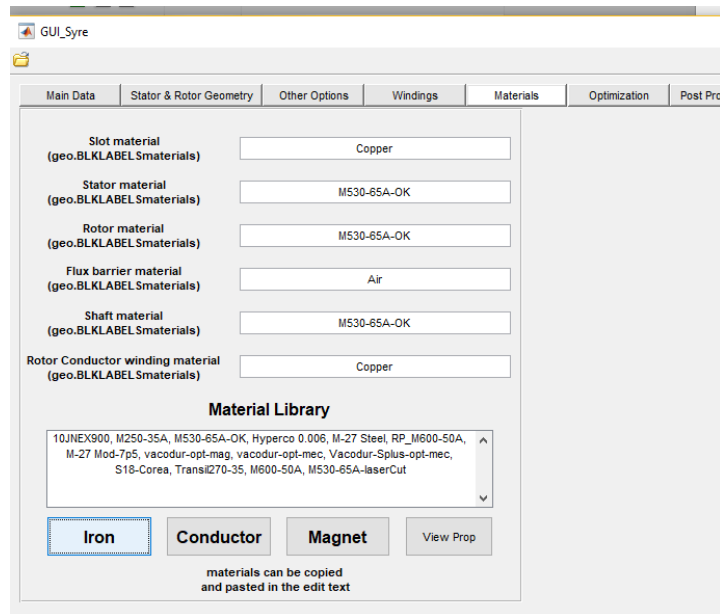
En la pestanya **"Windings"** es mostrarà la matriu del bobinat de la màquina, aquesta serà generada amb una crida interna del programa al software *Koil* ja pre-instal·lat a la carpeta de SyR-e.

	Slot n° 1	Slot n° 2	Slot n° 3	Slot n° 4	Slot n° 5
Layer 1	1	-1	-2	2	
Layer 2	1	2	-2	-3	



**Figura 1.6.** Consola de SyR-e a l'apartat de "Windings" (Font: Pròpia)

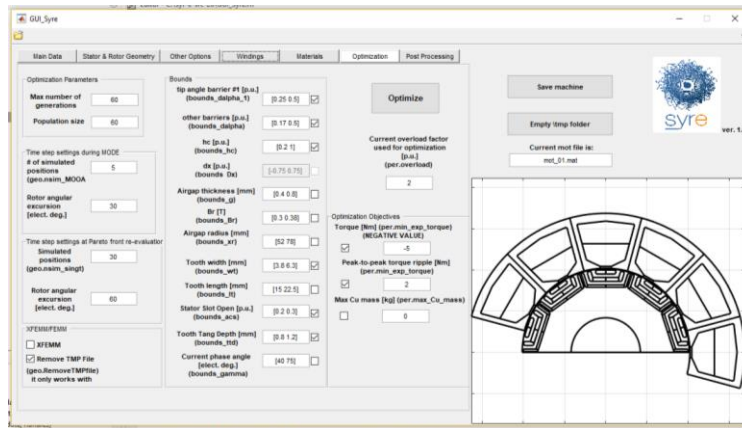
A la Pestanya **"Materials"** es permetrà la selecció dels diferents materials que conformen la màquina.



**Figura 1.7.** Consola de SyR-e a l'apartat de "Materials" (Font: Pròpia)

Per la Selecció de cada material s'haurà de triar una de les caselles de la part inferior per tal de veure els materials disponibles. Un cop decidit el material es seleccionarà i es farà un "copy paste" a la casella desitjada.

Per últim a la pestanya **"Optimization"** es podrà escollir els criteris amb els quals s'haurà de llançar la simulació.



**Figura 1.8.** Consola de SyR-e a l'apartat d'"Optimization" (Font: Pròpia)

Es deixaran els valors per defecte de les caselles i simplement es seleccionaran amb els "checks" els següents apartats de la secció Bounds:

- Tip angle barrier
- Other barriers
- Hc
- Tooth width
- Tooth length
- Stator Slot Open
- Tooth Tang Depth

Finalment també es marquen els apartats de Optimization Objectives:

- Torque
- Peak to peak torque ripple

Un cop realitzats tots els passos és pot iniciar la simulació iterativa clicant a la casella **"Optimize"**

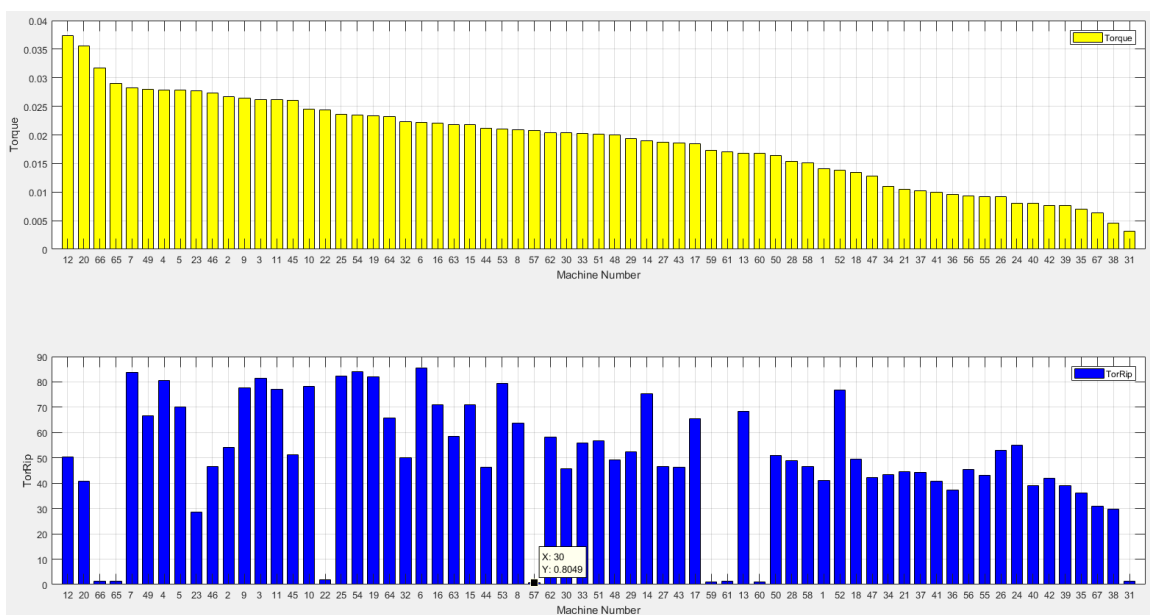
La simulació pot durar diverses hores ja que el Software fa múltiples iteracions.

## 2. Obtenció de resultats i interpretació d'aquests

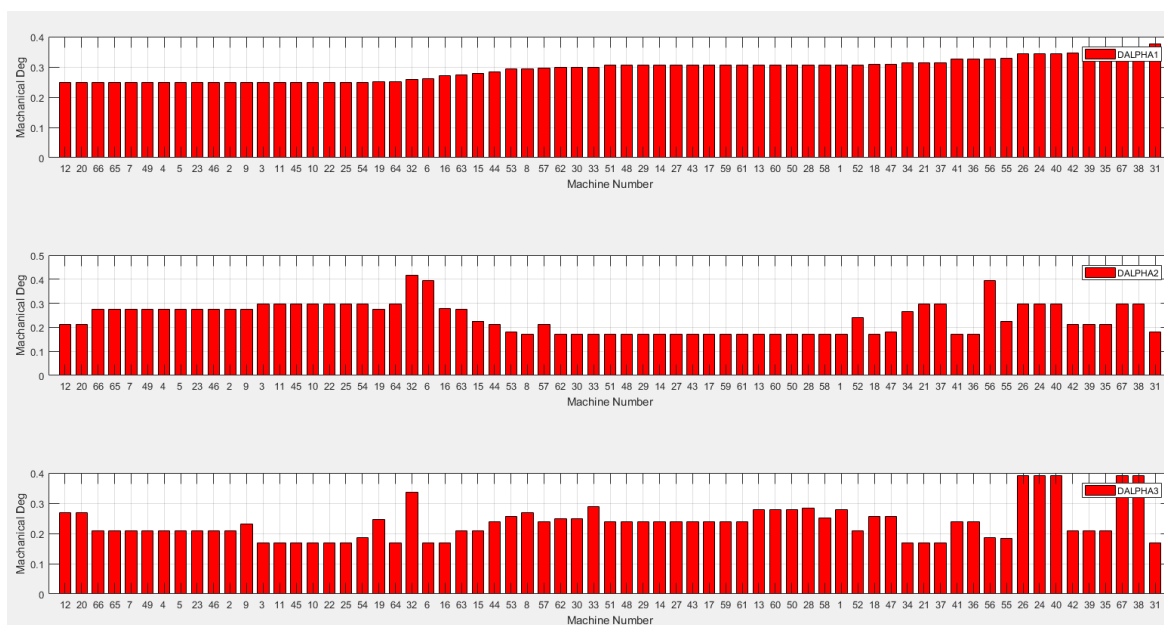
Un cop finalitzat el procés iteratiu es genera una carpeta dins de: C:\syr-e-src-26\results,

Aquí es troben els arxius de totes les màquines generades dins del procés, també s'hi troben arxius .fig que contenen gràfics de les característiques de les màquines generades.

A continuació s'exposen els gràfics de resultats (ja mostrats a la memòria):



**Figura 2.1.** Gràfics de les màquines resultants, parell i rissada (Font: Pròpia)



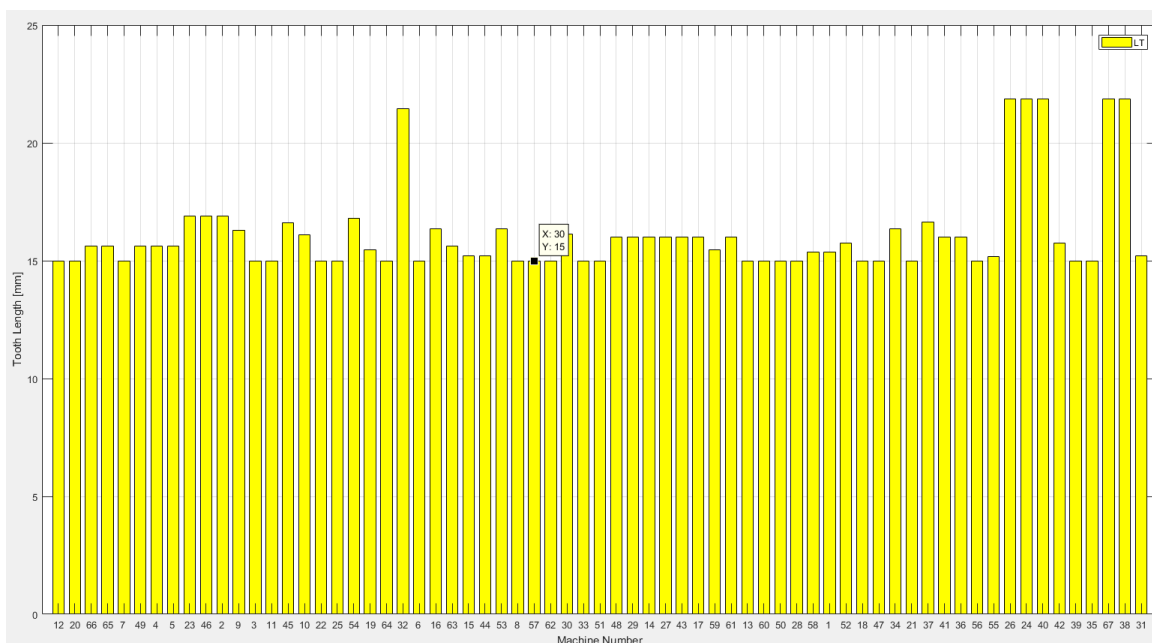
**Figura 2.2.** Gràfiques de les màquines resultants, valors de alfas (Font: Pròpia)



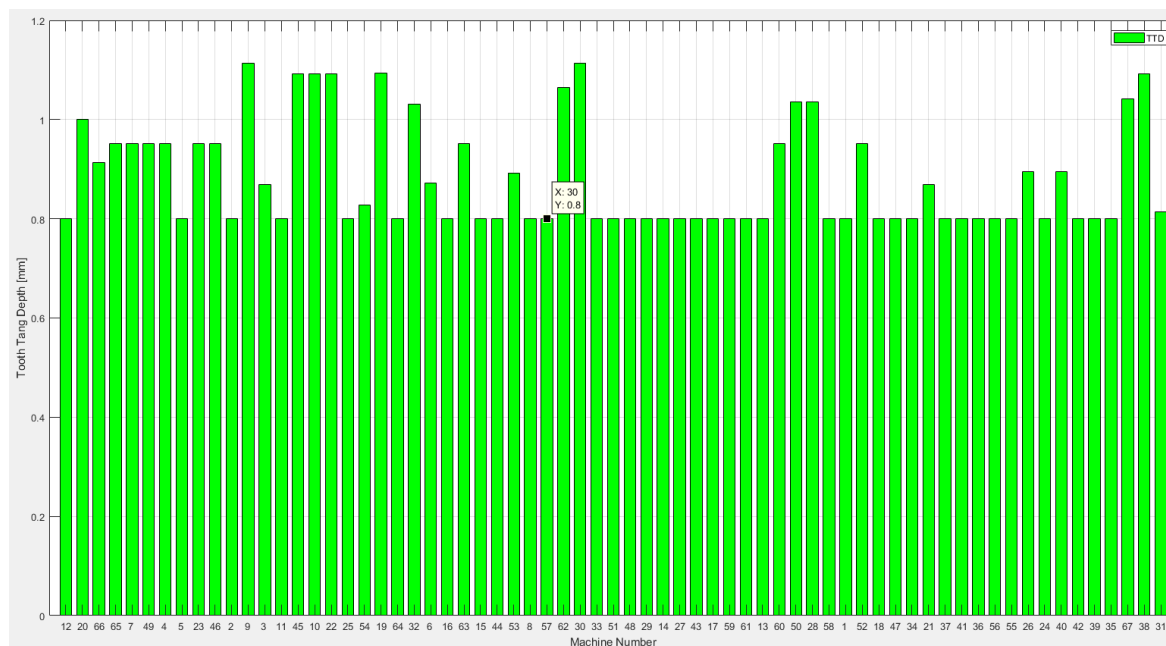
**Figura 2.3.** Gràfiques de les màquines resultants, valors de les HC (Font: Pròpia)



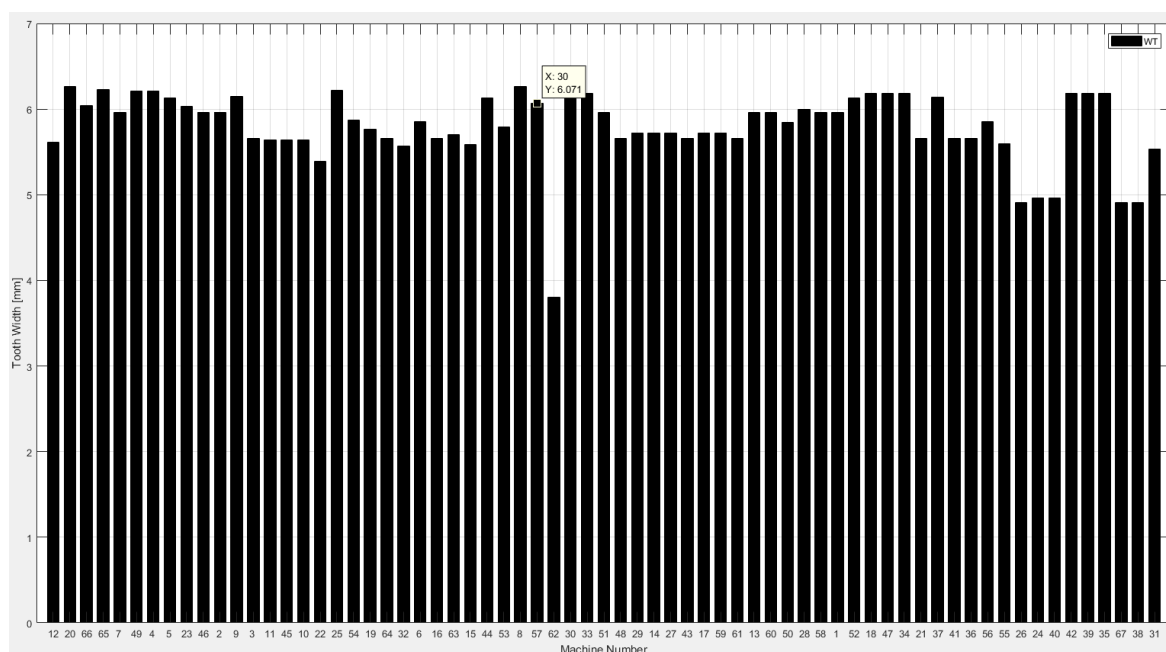
**Figura 2.4.** Gràfiques de les màquines resultants, valors de l'obertura de la ranura (Font: Pròpia)



**Figura 2.5.** Gràfiques de les màquines resultants, valors de la longitud de les dents (Font: Pròpia)



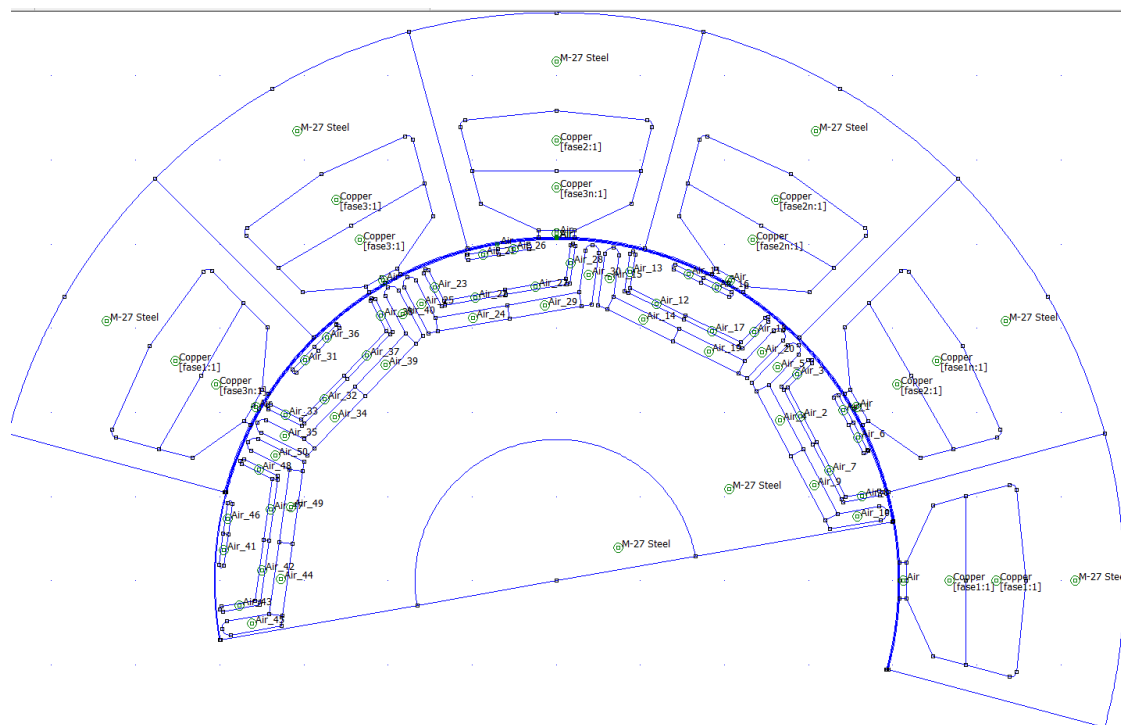
**Figura 2.6.** Gràfiques de les màquines resultants, valors de la longitud del fons de la ranura(Font: Pròpia)



**Figura 2.7..** Gràfiques de les màquines resultants, valors de la amplada de les dents (Font: Pròpia)



Finalment es mostra la geometria seleccionada de les múltiples generades pel SyR-e



**Figura 2.8.** .Captura de pantalla, fitxer .fem resultant de la màquina seleccionada (Font: Pròpia)



### 3. Post processat

Un cop ja obtinguts els resultats arriba el moment de seleccionar una de les màquines, en aquest cas es tria el MOT\_57, ja que és una màquina que en principi mostra una rissada de parell baixa i al mateix temps el parell resultat té un valor considerable.

A la consola de SyR-e, a la part superior esquerra, es clica damunt de la carpeta, s'obra una finestra, allà s'haurà de seleccionar el fitxer de la maquina 57 al directori on es tingui guardat.

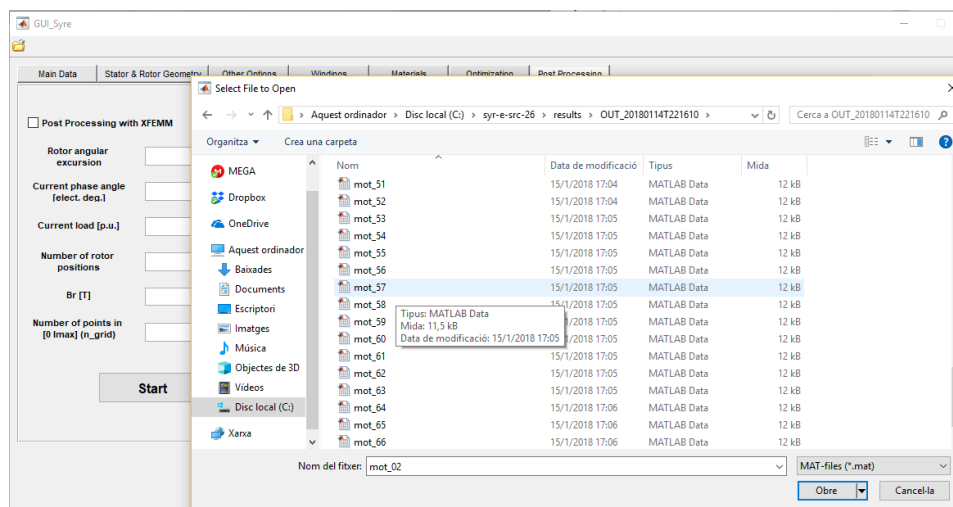
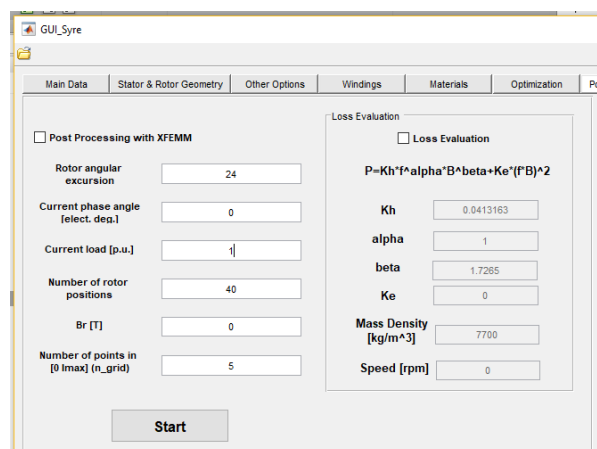


Figura 3.1. Consola de SyR-e, obertura d'un dels fitxers de resultat (Font: Pròpia)

Un cop ja seleccionada es carregaran les dades de la màquina a la consola del programa.

Un cop ja fet aquest pas, es va a la pestanya “**Post Processing**”.

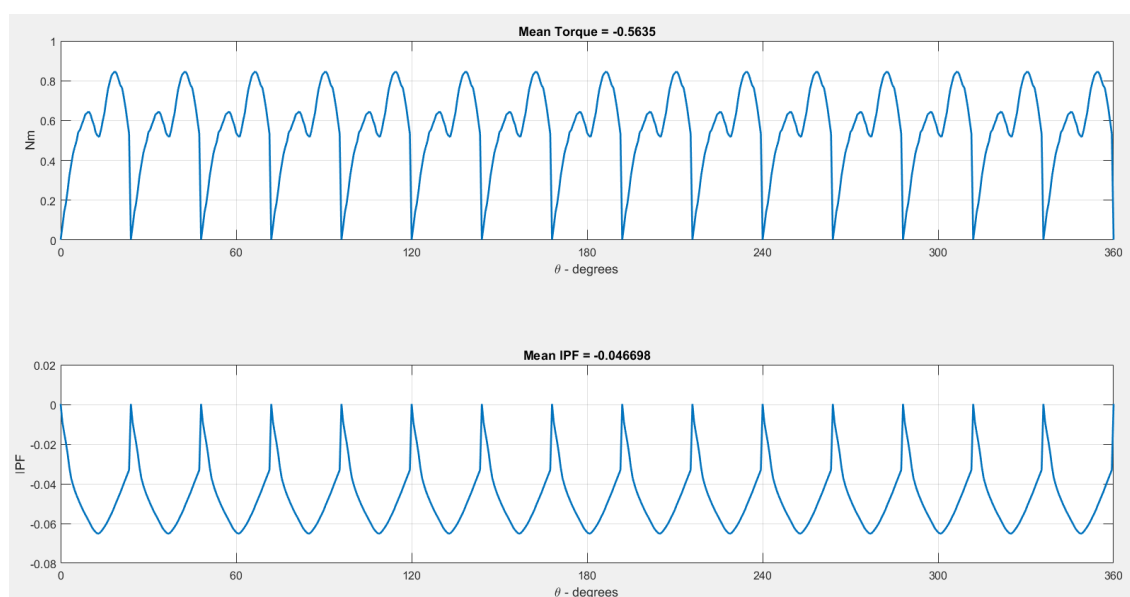


**Figura 3.2..** Consola de SyR-e a l'apartat de "Post Processing" (Font: Pròpia)

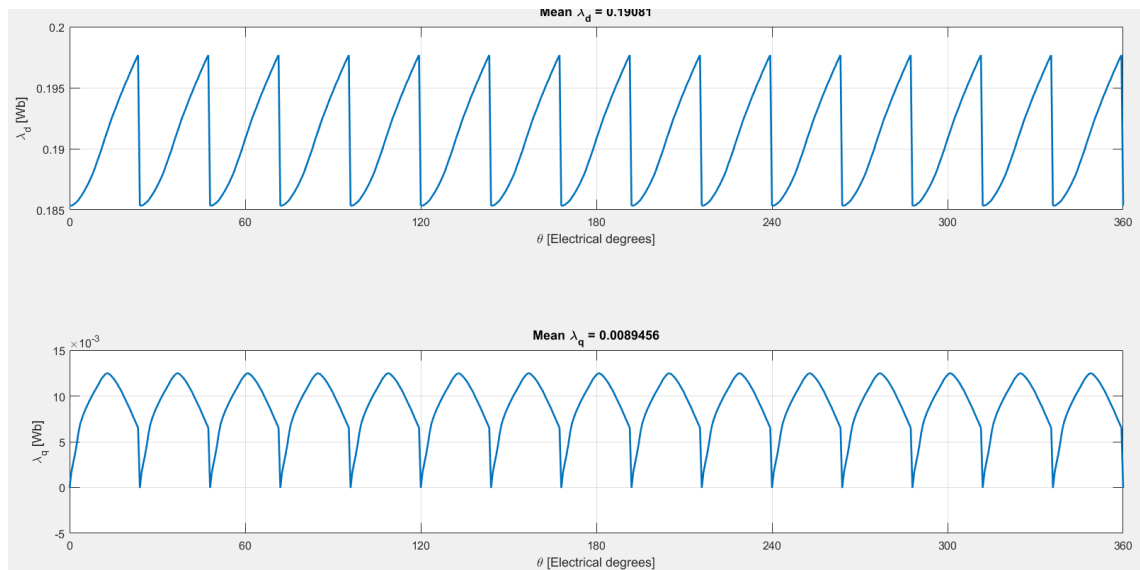
A les caselles de la part esquerra de la pantalla s'hi haurà d'introduir els paràmetres per tal d'obtenir gràfics característics de la màquina triada.

Es deixaran els valors per defecte en tots als apartats menys: *Rotor angular excursion*, *Current phase angle* i *Number of rotor positions*. El primer valor es canviarà a zero per indicar que volem un resultat en 2D, en funció de la posició del rotor, el segon a 24 i el tercer a un total de 40 posicions.

El resultat obtingut són les gràfiques següents:



**Figura 3.3..** Gràfiques, parell i IPF de la màquina seleccionada (Font: Pròpia)



**Figura 3.4.** Gràfiques, Landa d i Landa q de la màquina seleccionada (Font: Pròpia)

Les gràfiques mostren característiques bàsiques de la màquina, com ara: el parell en funció de la posició del rotor el factor de potència de la màquina i els dos fluxos característics (Directe i en Quadratura).

Finalment es llança una simulació amb *Current phase angle* amb valor 1000. Les gràfiques obtingudes s'ón amb 3 dimensions i mostren les característiques de la màquina en funció dels fluxos característics:

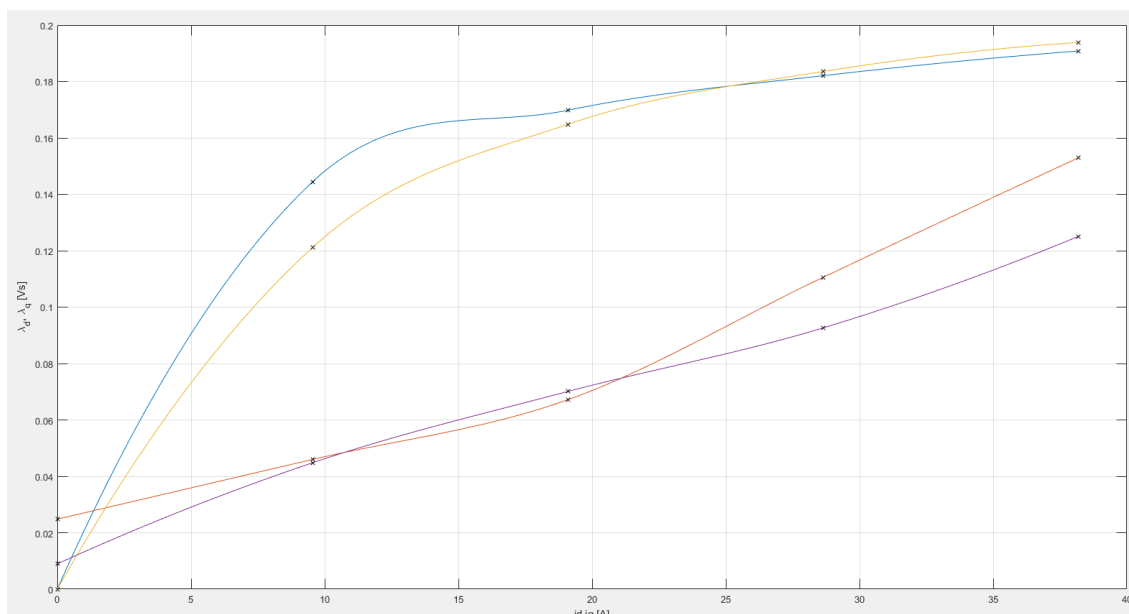


Figura 3.5. Gràfica, Fluxos Directe i en Quadratura en funció dels corrents (Font: Pròpia)

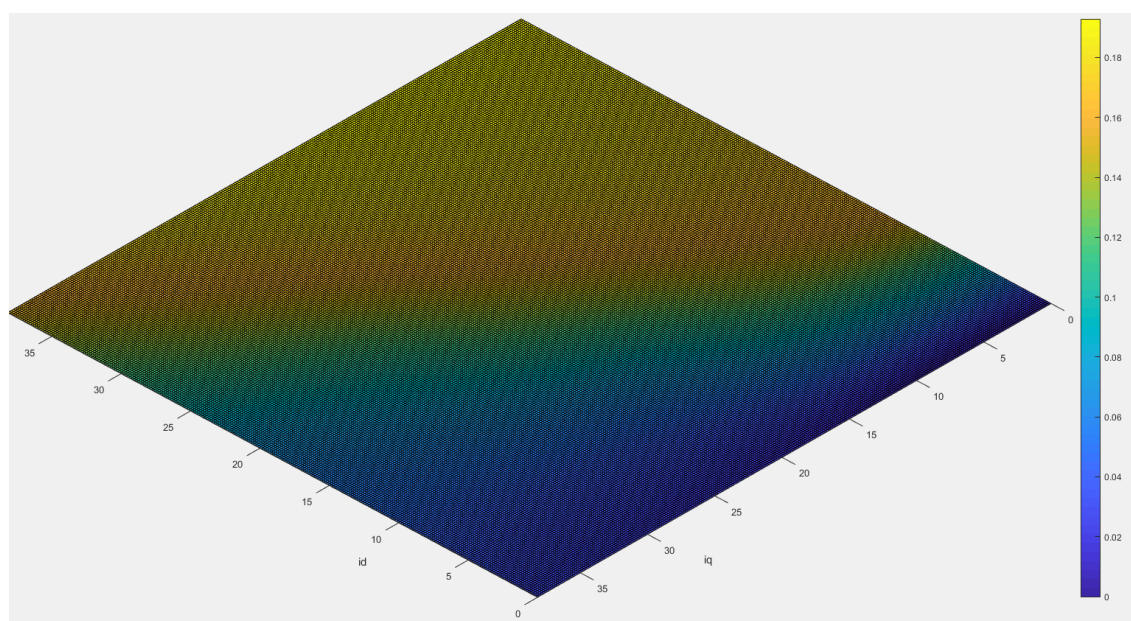
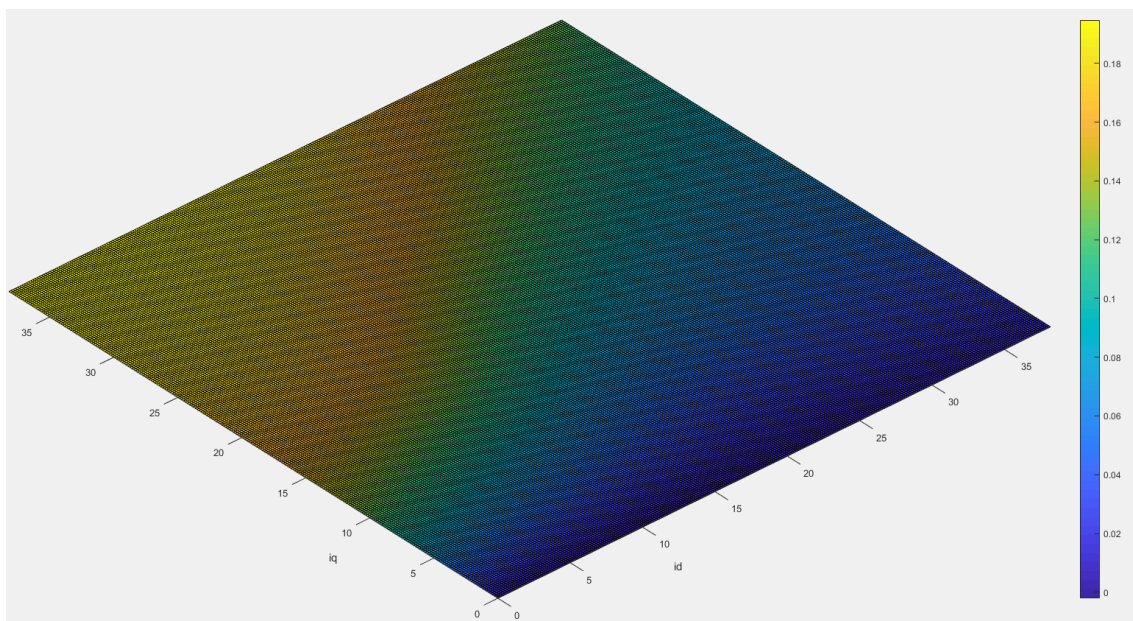
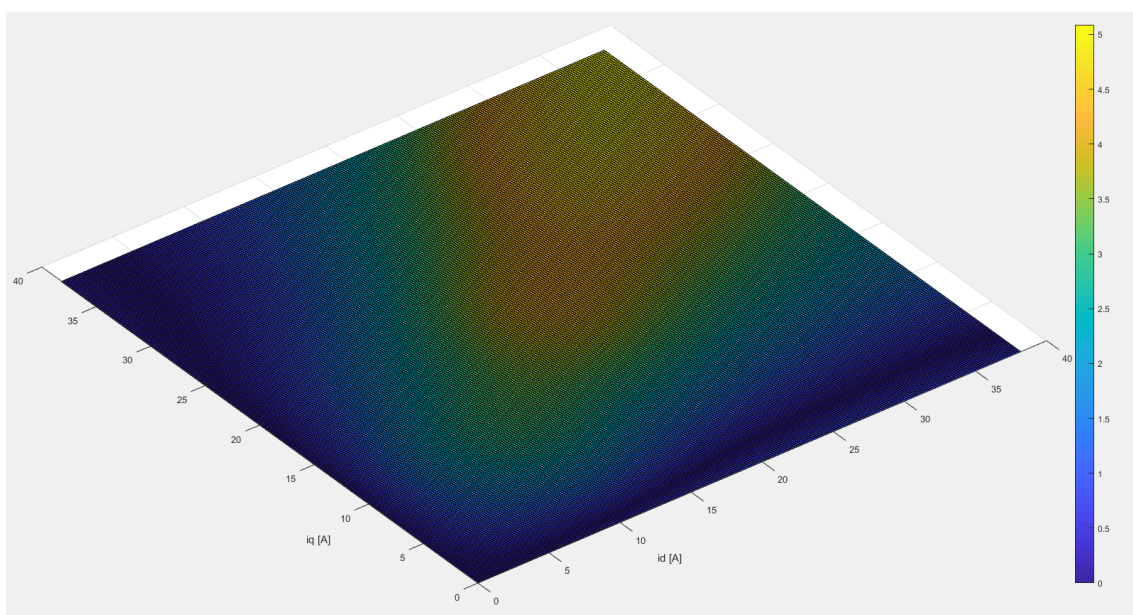


Figura 3.6. Gràfica, Flux Directe (Wb) (Barra de colors) en funció dels valors de les intensitats  $I_q$  i  $I_d$  (Font: Pròpia)

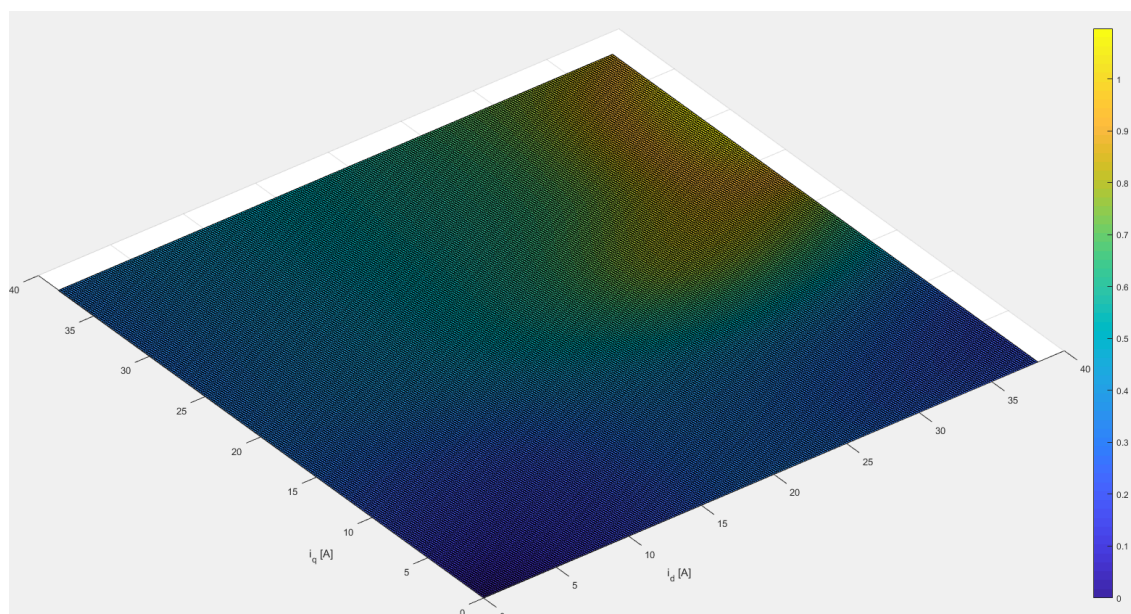


**Figura 3.7.** Gràfica, Flux en Quadratura (Wb) (Barra de colors) en funció dels valors de les intensitats  $I_q$  i  $I_d$  (Font: Pròpia)

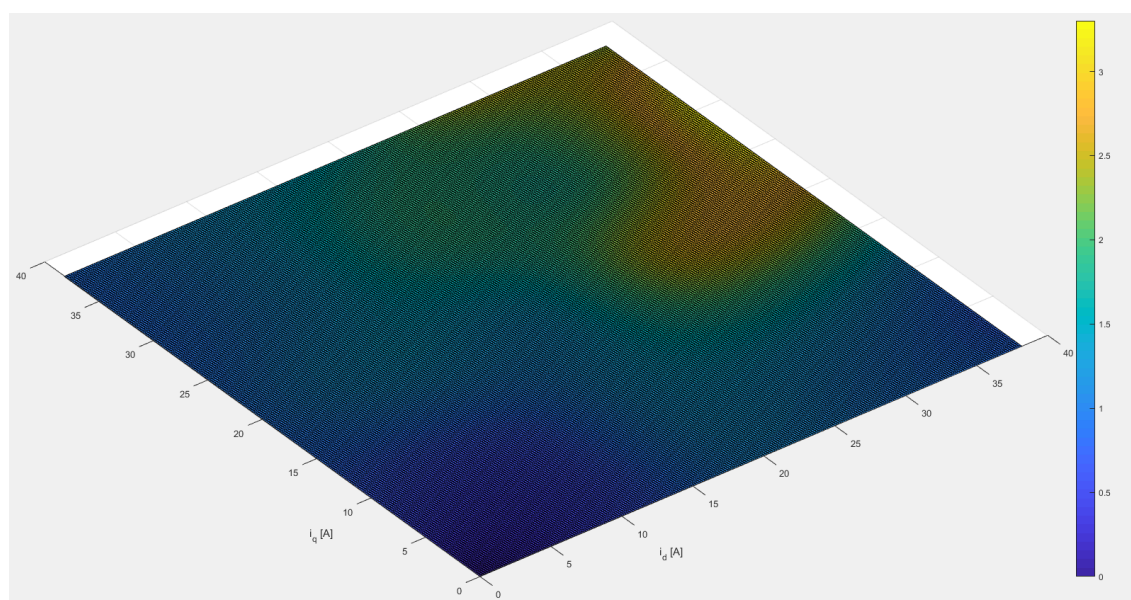


**Figura 3.8.** Gràfica, Parell (Barra de colors) (Nm) en funció dels valors de les intensitats  $I_q$  i  $I_d$  (Font: Pròpia)

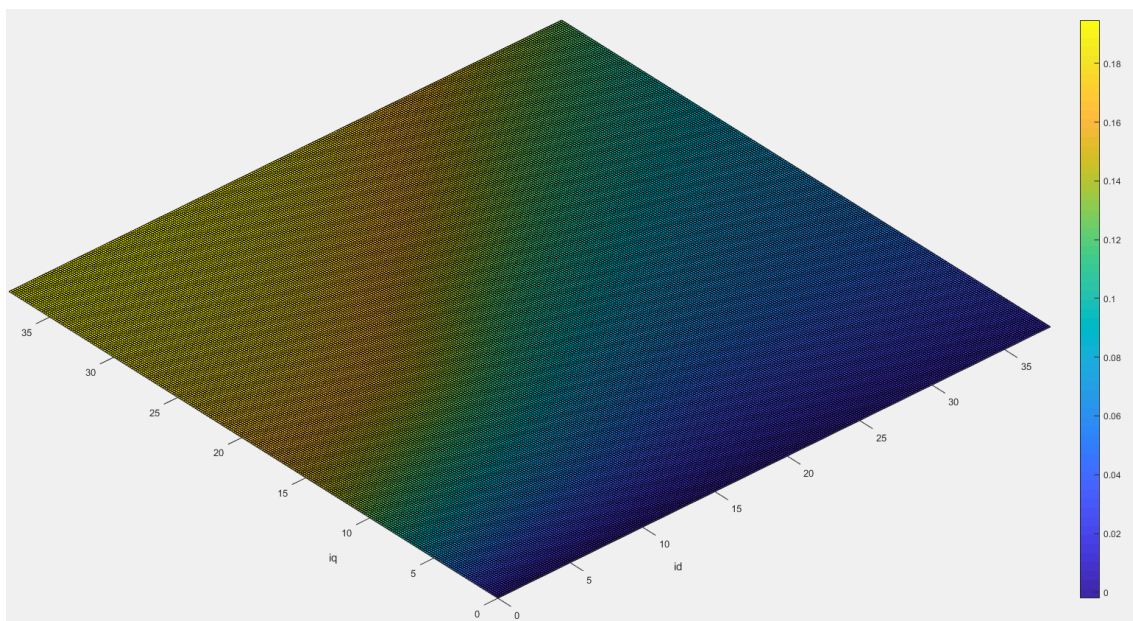




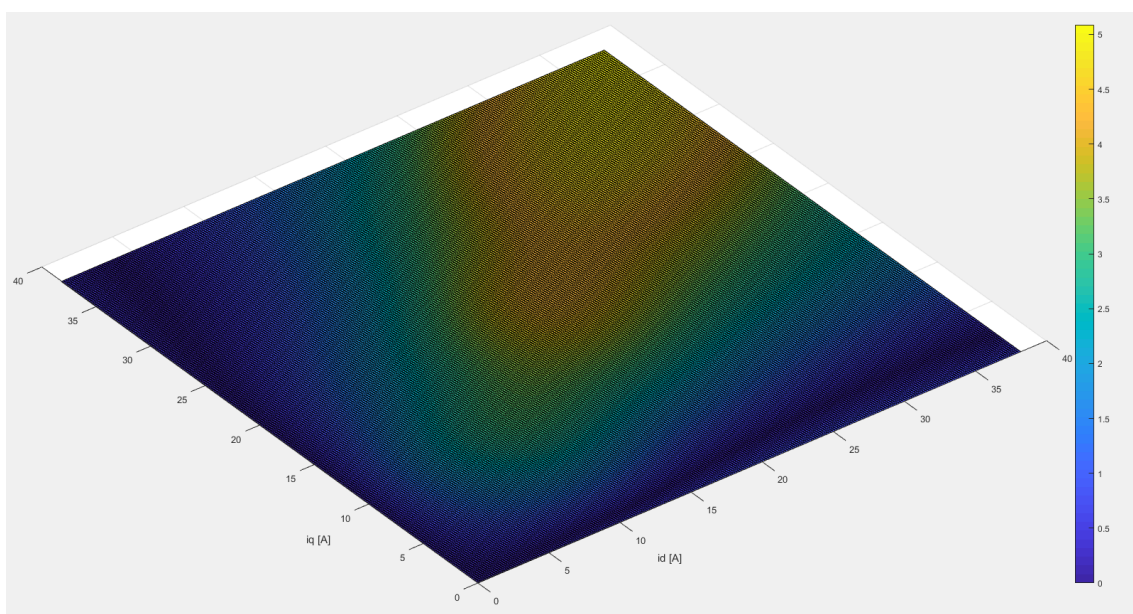
**Figura 3.9.** Gràfica, Rissada del Parell (%) (Barra de colors) en funció dels valors de  $I_q$  i  $I_d$  (Font: Pròpia)



**Figura 3.10.** Gràfica, Rissada del Parell de pic a pic (Nm) (Barra de colors) en funció dels valors de  $I_q$  i  $I_d$  (Font: Pròpia)

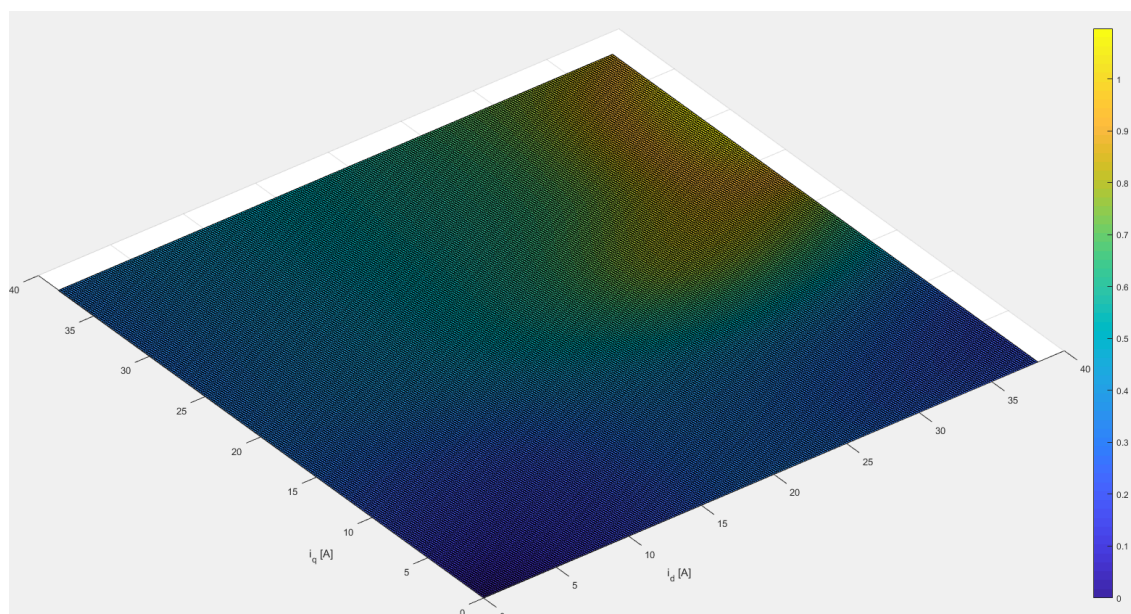


**Figura 3.11.** Gràfica, Flux en Quadratura (Wb) (Barra de colors) en funció dels valors de les intensitats Iq i Id (Font: Pròpia)

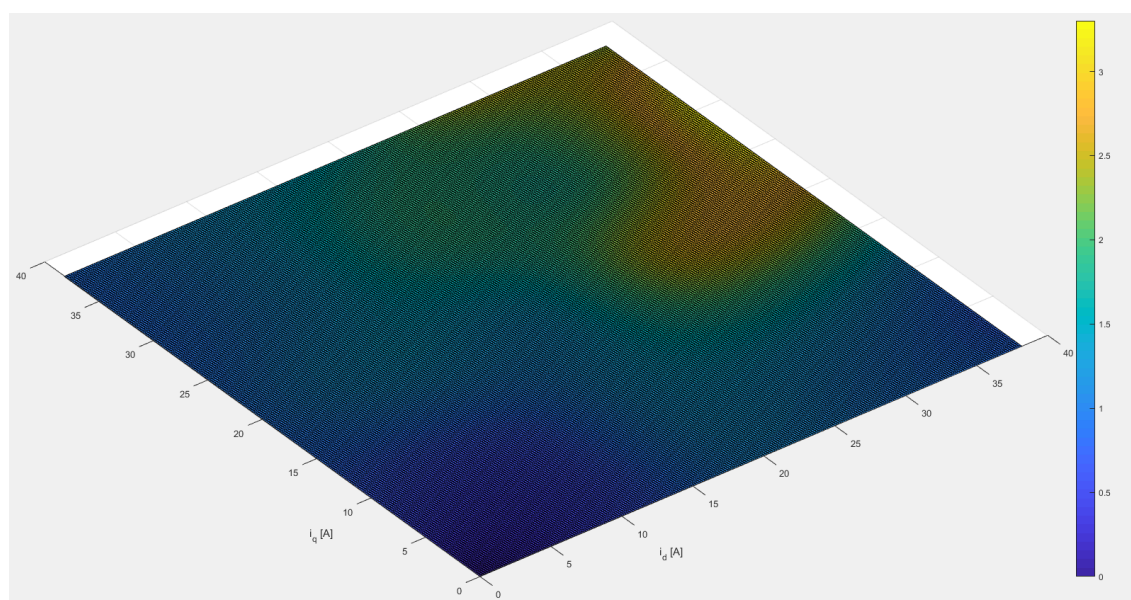


**Figura 3.12.** Gràfica, Parell (Barra de colors) (Nm) en funció dels valors de les intensitats Iq i Id (Font: Pròpia)





**Figura 3.13.** Gràfica, Rissada del Parell (%) (Barra de colors) en funció dels valors de  $I_q$  i  $I_d$  (Font: Pròpia)



**Figura 3.14.** Gràfica, Rissada del Parell de pic a pic (Nm) (Barra de colors) en funció dels valors de  $I_q$  i  $I_d$  (Font: Pròpia)



## **Annex D - CODIS LUA EMPRATS A LA SIMULACIÓ AMB ELEMENTS FINITS (FEMM)**

**Aquest document contempla tots els codis del llenguatge LUA utilitzats per a la simulació amb el programa FEMM.**

**Aquests codis s'han fet servir per calcular les característiques magnètiques de la màquina tipus, els apartats amb que es dividirà el document són els següents:**

- **Obtenció del parell per diferents posicions del rotor.**
- **Obtenció del parell girant de la màquina.**
- **Càlcul de les pèrdues en el ferro.**

## 1. Obtenció del parell per diferents posicions del rotor

El codi implementat fa girar el rotor del motor 1º a cada iteració i guarda en un fitxer el valor del parell en el punt simulat.

```
open("NOM_A_SIMULAR.fem")
mi_saveas("NOM_A_SIMULAR_TEMP.fem")
periode=0
step=0
periode=360/4
step=periode/90

for deg=0, 2*periode, step do
    mi_analyze(1)
    mi_loadsolution()
    --Gogin torque
    mo_selectblock(2,24)
    cog=mo_blockintegral(22)
    mo_clearblock()
    mi_seteditmode("group")
    mi_selectgroup(2)
    mi_moverotate(0,0,step)
    --guardar fitxer
    handle=openfile("PARELL180 MAX.txt","a")
    write(handle,deg," ",cog," ", "\n")
    closefile(handle)
    mo_close()
end
```

## 2. Obtenció del parell girant de la màquina

El codi LUA simula una màquina girant alimentada per un corrent de caràcter sinusoidal. El codi varia el corrent de cada fase en funció de l'angle mecànic amb que es troba el rotor. Després guarda en un fitxer de text pla el valor del parell i intensitats de cada fase.

```
open("NOM_A_SIMULAR.fem")

mi_saveas("NOM_A_SIMULAR_TEMP.fem")

p=5-- Nombre de parell de pols

periode=360/p

step=periode/20

Imax=2.62*sqrt(2)--Valor eficaç de la intensitat

alfa=0 -- Valor de l'angle elèctric


for deg=0,2*periode,step do

    --Valors de les intensitats en funció de la posició del rotor

    Ia=Imax*cos(alfa*pi/180)-- Fase A a 0° inicialment

    Ib=Imax*cos(alfa*pi/180+2*pi/3)--Fase B a 120° inicialment

    Ic=Imax*cos(alfa*pi/180-2*pi/3)--Fase C a -120° inicialment

    --Modificació del valor per cada fase

    mi_modifycircprop("FaseA",1,Ia)

    mi_modifycircprop("FaseB",1,Ib)

    mi_modifycircprop("FaseC",1,Ic)

    --mi_modifycircprop("fase1n",1,-Ia)

    -- mi_modifycircprop("fase2n",1,-Ib)

    -- mi_modifycircprop("fase3n",1,-Ic)

    mi_analyze(1)
```

```

mi_loadsolution()

mo_selectblock(2,24)

Mi=mo_blockintegral(22)

mo_clearblock()

--Propietats de les diferents fases: Intensitat, Voltatge i Flux

ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("FaseA")
ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("FaseB")
ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("FaseC")

--ian,va,fa=mo_getcircuitproperties("fase1n")
--ibn,vb,fb=mo_getcircuitproperties("fase2n")
--icn,vc,fc=mo_getcircuitproperties("fase3n")

--Rotació del rotor

mi_seteditmode("group")

mi_selectgroup(2)

mi_moverotate(0,0,-step)

alfa=alfa+p*step

handle=openfile("parellgirantM5modR3.txt","a") -- es crea un fitxer .txt

write(handle,deg," ",Mi," ",ia," ",ib," ",ic," ",fa," ",fb," ",fc,"\n") --
Impresió del valors al .txt

closefile(handle)

mo_close()

end

```

### 3. Càlcul de les pèrdues en el ferro

El codi gira el rotor i fa variar el corrent igual que el dels apartats anteriors, a part també incorpora un apartat de càlcul de les pèrdues del ferro (del Rotor i l'Estator) mitjançant la utilització dels coeficients de Bertotti pertinentment calculats a l'annex adjunt.

```
open("NOM_A_SIMULAR.fem")
mi_saveas("NOM_A_SIMULAR_TEMP.fem")

p=5

periode=360/p

step=periode/20

pi=3.1415926

Imax=2.62*sqrt(2)

alfa=0

---calcul de perdues en el ferro.

---mètode estàtic.

freq=250

--profunditat en m

depth=0.075

Pfes=0

Pfer=0

--coef del model de pèrdues. Bertotti.

Kc=1.773

Kh=3.256

Ka=0

for deg=0,2*periode,step do

    Ia=Imax*cos(alfa*pi/180)

    Ib=Imax*cos(alfa*pi/180+2*pi/3)

    Ic=Imax*cos(alfa*pi/180-2*pi/3)
```

```

mi_modifycircprop("FaseA",1,Ia)
mi_modifycircprop("FaseB",1,Ib)
mi_modifycircprop("FaseC",1,Ic)
mi_analyze(1)
mi_loadsolution()
mo_selectblock(2,24)
Mi=mo_blockintegral(22)
mo_clearblock()
ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("FaseA")
ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("FaseB")
ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("FaseC")

Pfer=0
Pfes=0

----calcul de perdues en el ferro

mo_smooth("off")
numelm=mo_numelements()
for k=1,numelm do

--Perdues estator

--propietats a cada element

--p1, p2, p3: potencial magnètic a cada vertex del triangle

--x,y: coordenades del centroide del triangle.

--a:area de l'element

--g:grup al que pertany l'element

    p1,p2,p3,x,y,a,g=mo_getelement(k)

    if (g==2000) then

        --volum de l'element

        dv= depth*a*mm^2

```

```

-- propietats del centroide

a,bx,by,sig,e,hx,hy=mo_getpointvalues(x,y)

Bx=abs(bx)

By=abs(by)

Bmod=sqrt(Bx^2+By^2)

--perdues

Pfes=Pfes+(Kh*freq*Bmod^2+Kc*(freq*Bmod)^2+Ka*(freq*Bmod)^1.5)*dv

end

-----Pfe Rotor

--propietats a cada element

--p1, p2, p3: potencial magnètic a cada vertex del triangle

--x,y: coordenades del centroide del triangle.

--a:area de l'element

--g:grup al que pertany l'element

p1,p2,p3,x,y,a,g=mo_getelement(k)

if (g==2) then

    --volum de l'element

    dv=depth*a*mm^2

    --propietats del centroide

    a,bx,by,sig,e,hx,hy=mo_getpointvalues(x,y)

    Bx=abs(bx)

    By=abs(by)

    Bmod=sqrt(Bx^2+By^2)

    --perdues

    Pfer=Pfer+(Kh*freq*Bmod^2+Kc*(freq*Bmod)^2+Ka*(freq*Bmod)^1.5)*dv

end

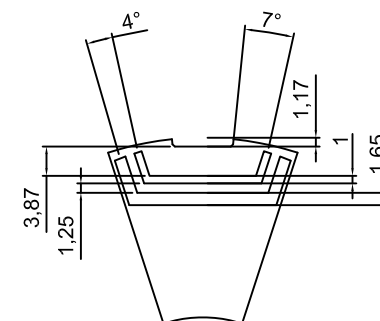
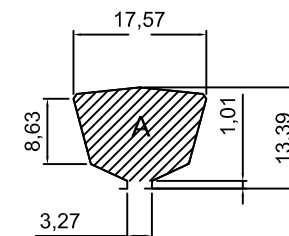
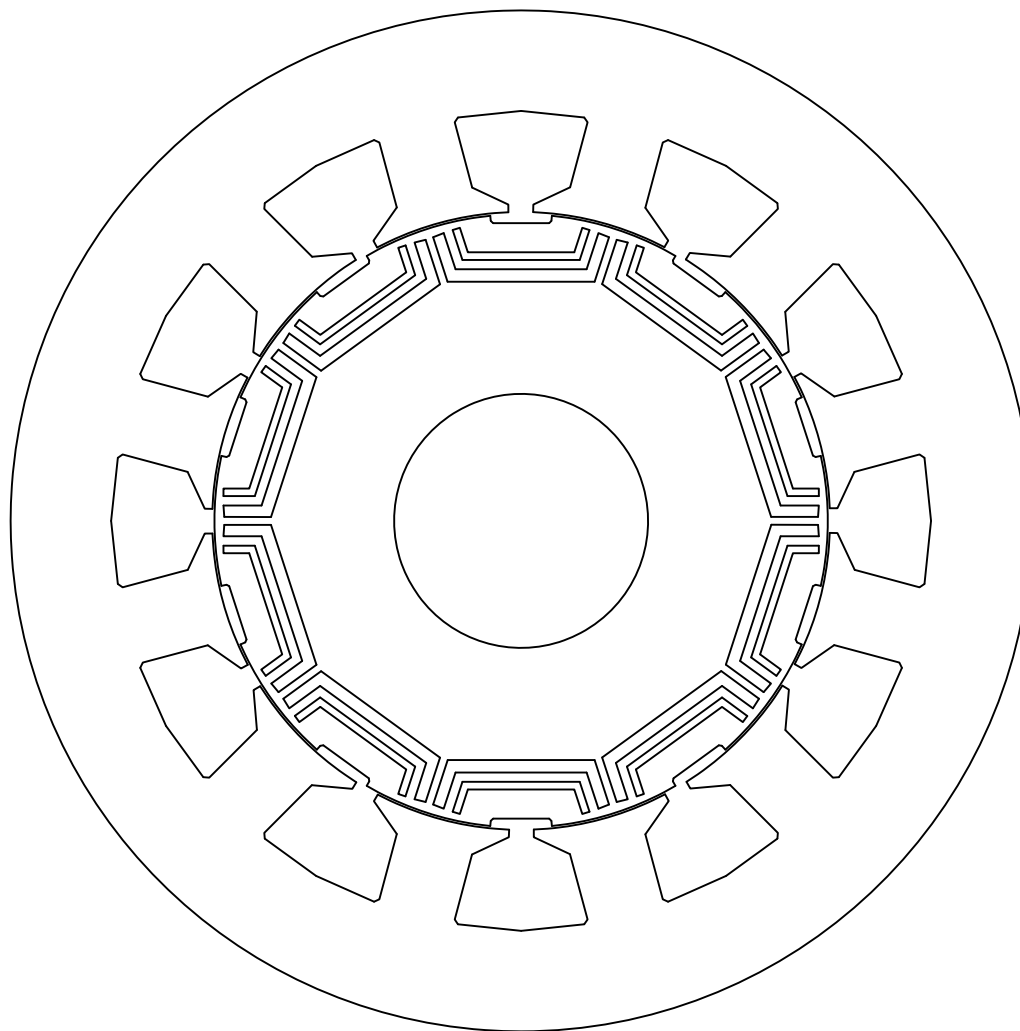
end

```



```
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(2)
mi_moverotate(0,0,-step)
alfa=alfa+p*step
handle=openfile("parellgirantperdu25075R3.txt","a")
write(handle,deg," ",Mi," ",ia," ",ib," ",ic," ",fa," ",fb," ",fc,"
",Pfes," ",Pfer,"\n")
closefile(handle)
mo_close()
end
```

## **Annex E - PLÀNOLS**



M270-50a .50mm								
De	Di	N	A		de	di	N	g
135	81,7	12	234		81,1	33,58	10	0,3

PROJECTE: **DISSENY D'UNA SÈRIE DE MOTORS D'EFICIÈNCIA IE5**

PLÀNOL: **XAPA MAGNÈTICA DEL ROTOR I L'ESTATOR**

AUTOR: **RICARD COMA COLL**

NÚM. PLÀNOL: **01** FULL: **01/01**

ESCOLA:

EEBE

UNIVERSITAT:UNI. POLI. CAT.

ESCALA: 1:1

DATA: **MAIG del 2018**

DIBUIXAT:

RCC

COMPROVAT:

RBP

TREBALL FI DE GRAU

APROVAT:

RBP

Grau en Enginyeria Elèctrica

REVISIÓ:

—



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**  
**BARCELONATECH**

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

## **Annex F - DOCUMENTS D'INTERÈS**

**Aquest annex conté els següents documents d'interès:**

- **Taula d'eficiències IE5**
- **Paper: Alimentació del motor amb el mètode MTPA**

**Taula extreta de la normativa IEC TS 60034-30-2:2016 © IEC 2016**

Rated output power $P_N$ [kW] at rated speed and	Rated speed within 600 to 900 /min	Rated speed within 901 to 1 200 /min	Rated speed within 1 201 to 1 800 /min	Rated speed within 1 801 to 6 000 /min
0,12	67,4	69,8	74,3	71,4
0,18	71,9	74,6	78,7	75,2
0,20	73,0	75,7	79,6	76,2
0,25	75,2	78,1	81,5	78,3
0,37	78,4	81,6	84,3	81,7
0,40	78,9	82,2	84,8	82,3
0,55	80,6	84,2	86,7	84,6
0,75	82,0	85,7	88,2	86,3
1,1	84,0	87,2	89,5	87,8
1,5	85,5	88,4	90,4	88,9
2,2	87,2	89,7	91,4	90,2
3	88,4	90,6	92,1	91,1
4	89,4	91,4	92,8	91,8
5,5	90,4	92,2	93,4	92,6
7,5	91,3	92,9	94,0	93,3
11	92,2	93,7	94,6	94,0
15	92,9	94,3	95,1	94,5
18,5	93,3	94,6	95,3	94,9
22	93,6	94,9	95,5	95,1
30	94,1	95,3	95,9	95,5
37	94,4	95,6	96,1	95,8
45	94,7	95,8	96,3	96,0
55	94,9	96,0	96,5	96,2
75	95,3	96,3	96,7	96,5
90	95,5	96,5	96,9	96,6
110	95,7	96,6	97,0	96,8
132	95,9	96,8	97,1	96,9
160	96,1	96,9	97,2	97,0
200 up to 1 000	96,3	97,0	97,4	97,2

#### 4.10 Interpolation of reference values at intermediate powers

To determine reference values for variable speed motors with rated powers not given in Tables 2, 3, 4, 5 and 6 within the range of 0,12 kW up to 200 kW the following formula shall be applied:

$$\eta_{\text{ref}} = A \cdot [\log_{10}\{P_N\}]^3 + B \cdot [\log_{10}\{P_N\}]^2 + C \cdot [\log_{10}\{P_N\}] + D$$

Where  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  are interpolation coefficients (see Table 7 and Table 8);  $P_N$  is given in [kW].

IE-Code	Coefficients	Rated speed within 600 to 900 /min	Rated speed within 901 to 1 200 /min	Rated speed within 1 201 to 1 800 /min	Rated speed within 1 801 to 6 000 /min
IE1	A	2,4433	0,0786	0,5234	0,5234
	B	-13,8	-3,5838	-5,0499	-5,0499
	C	30,656	17,2918	17,4180	17,4180
	D	65,238	72,2383	74,3171	74,3171
IE2	A	2,1311	0,0148	0,0278	0,2972
	B	-12,029	-2,4978	-1,9247	-3,3454
	C	26,719	13,2470	10,4395	13,0651
	D	69,735	77,5603	80,9761	79,077
IE3	A	0,7189	0,1252	0,0773	0,3569
	B	-5,1678	-2,613	-1,8951	-3,3076
	C	15,705	11,9963	9,2984	11,6108
	D	77,074	80,4769	83,7025	82,2503
IE4	A	0,6556	0,3598	0,2412	0,34
	B	-4,7229	-3,2107	-2,3608	-3,0479
	C	13,977	10,7933	8,446	10,293
	D	80,247	84,107	86,8321	84,8208
IE5	A	0,6183	0,3394	0,2459	0,3106
	B	-4,2672	-2,8578	-2,136	-2,6854
	C	12,0866	9,2088	7,1743	8,7516
	D	83,5379	86,8489	89,1712	87,4633

The determined efficiency  $\eta_{90}$  shall be greater than or equal to the nominal efficiency  $\eta_n$  of the designated efficiency class (IE-code).

The nominal efficiency  $\eta_n$  of the IE1 - IE5 classes according to this document shall be calculated from the respective reference value  $\eta_{ref}$  given in Tables 2 to 6 or determined according to the interpolation given in 4.10, reduced by an allowance due to additional harmonic losses and efficiency determination at partial speed (90 %) by applying the following formula:

$$\eta_n = \frac{1}{1 + (1 + r_{HL}) \cdot \left( \frac{1}{\eta_{ref}} - 1 \right)}$$

The additional harmonic loss factor  $r_{HL}$  is:

$r_{HL} = 0,15$  (15 %) for motors with a rated output power up to and including 90 kW;

$r_{HL} = 0,25$  (25 %) for motors with a rated output power above 90 kW.

$\eta_n$  and  $\eta_{ref}$  shall be given as numbers in the range of (0...1). The result shall be mathematically rounded to three decimal places or one decimal place when the efficiency is expressed as a percentage value.

NOTE 4 The change of the value of  $r_{HL}$  at 90 kW reflects the change of the switching frequency of the comparable converter as defined in IEC TS 60034-2-3.



# MTPA and Field Weakening Control of Synchronous Reluctance Motor

S.M.Ferdous,<sup>1</sup> Pablo Garcia,<sup>1</sup> Mohammad Abdul Moin Oninda,<sup>2,\*</sup> and Md. Ashraful Hoque<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical, Electronics, Computers and Systems Engineering, University of Oviedo, Gijon, Asturias, Spain-33204.

<sup>2</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Islamic University of Technology, Board Bazar, Gazipur-1704, Bangladesh.

\*mamoin@iut-dhaka.edu

**Abstract**—An improved algorithm for MTPA (Maximum Torque Per Ampere) and Field Weakening operation which is suitable for implementation with Field Oriented Control, has been proposed for the Synchronous Reluctance motor (SynRel) for high dynamic performance. The proposed method overcomes the problem of excessive current flow into the machine while generating the d-axis and q-axis current commands independently. At the same time to operate the inverter in the linear modulation region ( $0 \leq m \leq 1$ ) to minimize the output torque ripple. The proposed method helps to attain MTPA operation below the base speed to operate with the rated load and a fast speed response in Field Weakening mode. The validity and efficacy of the proposed algorithm is verified by simulation in MATLAB and SIMULINK.

**Index Terms**—Field-weakening; MTPA; FOC; Synchronous Reluctance (SynRel) Motor

## I. INTRODUCTION

Due to absence of permanent magnet, Synchronous Reluctance Motor has very poor Torque production capability and relatively low power factor. Hence it is imperative that, the torque production has to be maximized for such kind of motor. MTPA (Maximum Torque per Ampere) is the most common method to maximize the torque production of a motor for a certain amount of current and hence also play a role to improve the overall efficiency [1].

Absence of rotor winding, low torque ripple, low cost and robustness makes a SynRel motor more desirable compared to induction motors [2]-[5]. Moreover absence of permanent magnet gives it the added feature of being cost effective.

Most of the application demands wide speed range of operation which is achieved by Field Weakening. A SynRel Motor is basically a high speed motor with max Speed 2 to 5 times than that of the base speed. Several approaches are available in literature where Field weakening is achieved using the Dynamic Machine equations in d-q reference frame [6]-[8].

This paper represents an Algorithm to incorporate MTPA and FW methods applied together to obtain a high performance SynRel Motor Drives, best suited for Traction application. Basic rotor reference d-q Field Oriented Control equations are used to develop the model.

## II. MATHEMATICAL MODELLING OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR IN D-Q REFERENCE FRAME

### A. Dynamic Equation

A Synchronous Reluctance Motor does not have any permanent magnet or any winding in the rotor. Hence the

motor is modelled in rotor reference frame. The dynamic rotor reference frame equations for d and q axis voltages are-

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (2.1)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d \quad (2.2)$$

where,  $\omega_e$  = Rotor speed in elec. rad/s

The developed electromagnetic torque, in terms of d-q parameters, can be written as –

$$T_e = \frac{3P}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2.3)$$

where, P = No. of poles of the rotor

The dynamic equations for the mechanical subsystem can be expresses as –

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (2.4)$$

where,  $\omega_m$  = Rotor speed in mechanical rad/s,  $T_L$  = Load torque

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m$$

Two limiting parameters are needed to be addressed for implementing the Field Oriented Control or Vector Control of Synchronous Motor. They are –

$$I_{s,max}^2 = i_d^2 + i_q^2 \quad (2.5)$$

$$V_{s,max}^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad (2.6)$$

where,

$I_{s,max}$  = Maximum Allowable Current by the inverter

$V_{s,max}$  = Maximum Inverter voltage (per phase)

$$V_{s,max} = \frac{V_{dc}}{2}$$

where,  $V_{dc}$  = Inverter DC link voltage. Here, the inverter is operated under Sinusoidal PWM excitation.

The equivalent circuit for SynRel is shown in Fig.1–

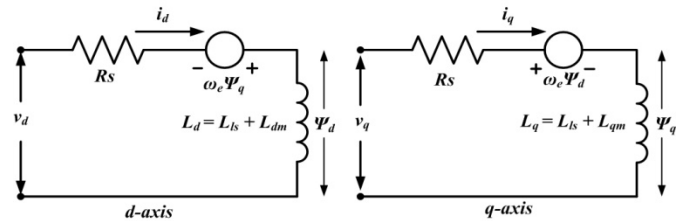


Fig. 1 Equivalent d-q circuit model of SynRel Motor

where,  $\psi_s$  = Total Stator Flux

$$\psi_s = \psi_d + \psi_q$$

$$L_d = \text{d-axis Inductance} = L_{ls} + L_{dm}$$

$$L_q = \text{q-axis Inductance} = L_{ls} + L_{qm}$$

$$L_{ls} = \text{Leakage Inductance}$$

$$L_{dm} = \text{d-axis Magnetizing Inductance}$$

$$L_{qm} = \text{q-axis Magnetizing Inductance}$$

### B. Determination of Operating Point

The operating point of the motor can be determined by plotting the current and voltage limit equation together in current plane ( $i_d$  vs  $i_q$ ). The current limit equation from (2.5) is an equation of a circle. The radius of the circle is  $I_{s,max}$  which represents the maximum allowable current in current plane.

Similarly, the voltage limit equation can also be plotted in the same diagram. To plot it with the same parameters, i.e. as a function of  $i_d$  and  $i_q$ ; the equation can be rewritten neglecting the resistive drops and derivative terms.

This is a valid assumption because at steady state the derivative term are zero and the resistive drops are much smaller than the Back EMF or Speed Induced voltages. Hence the voltage limit equation (2.6) can be written as [3]–

$$\begin{aligned} V_{s,max}^2 &= (-\omega_e L_d i_d)^2 + (\omega_e L_q i_q)^2 \\ V_{s,max}^2 &= \omega_e^2 L_d^2 i_d^2 + \omega_e^2 L_q^2 i_q^2 \\ I &= \frac{\omega_e^2 L_d^2 i_d^2}{V_{s,max}^2} + \frac{\omega_e^2 L_q^2 i_q^2}{V_{s,max}^2} \\ \frac{i_d^2}{\left(\frac{V_{s,max}^2}{\omega_e^2 L_d^2}\right)} + \frac{i_q^2}{\left(\frac{V_{s,max}^2}{\omega_e^2 L_q^2}\right)} &= I \\ \frac{i_d^2}{a^2} + \frac{i_q^2}{b^2} &= I \end{aligned} \quad (2.7)$$

where,

$$a = \frac{V_{s,max}}{\omega_e L_d}; \quad b = \frac{V_{s,max}}{\omega_e L_q}$$

This is an equation of an ellipse with centre (0, 0). As  $L_d > L_q$  vertex is equal to 'b' and co-vertex is equal to 'a', where  $b > a$ . Thus this is a vertical ellipse whose major axis lies along  $i_q$  and minor axis lies along  $i_d$ .

### III. MTPA OPERATION OF THE SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR

MTPA or Maximum Torque per Ampere operation is the most preferred mode of operation for any motor operating in Field Oriented Control (FOC). This operation provides the maximum amount of torque for a given operating current.

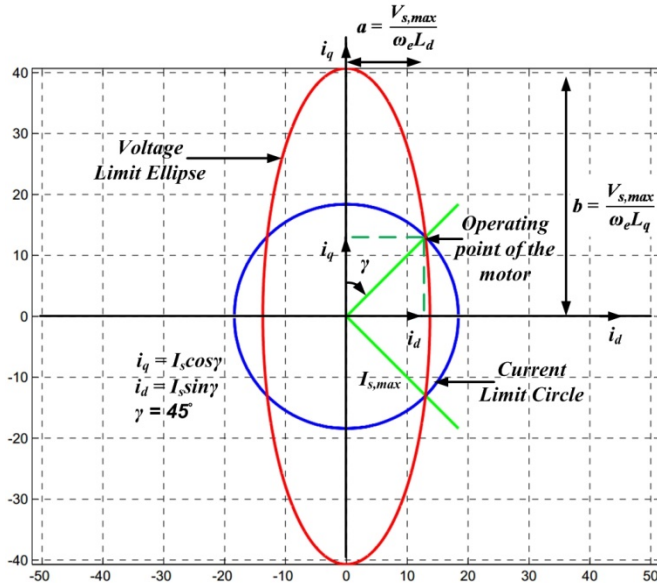


Fig. 2 Operating Characteristics of SynRel Motor

MTPA condition for SynRel Motor can be obtained from the torque equation.

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3P}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \\ i_d &= I_s \sin \gamma \\ i_q &= I_s \cos \gamma \\ T_{em} &= \frac{3P}{2} (L_d - L_q) I_s^2 \sin \gamma \cos \gamma \\ T_{em} &= K I_s^2 \frac{\sin 2\gamma}{2} \end{aligned}$$

where,

$$K = \frac{3P}{2} (L_d - L_q)$$

Condition for MTPA is obtained as–

$$\begin{aligned} \frac{dT_{em}}{d\gamma} &= \frac{K}{2} I_s^2 \cos 2\gamma \cdot 2 = 0 \\ \cos 2\gamma &= 0 \\ \cos 2\gamma &= \cos 90^\circ \\ \gamma &= \frac{90}{2} = 45^\circ \\ \gamma_{MTPA} &= 45^\circ \end{aligned}$$

Thus, the equation for torque under MTPA operation

$$T_{em} = K \frac{I_s^2}{2} \sin 2\gamma = K \frac{I_s^2}{2} \Big|_{\gamma=45^\circ}$$

$$I_s = \frac{\sqrt{T_{em}}}{\sqrt{K}} = \frac{1}{\sqrt{K}} \times \sqrt{T_{em}} \quad (3.1)$$

$$i_d = I_s \sin 45^\circ = \frac{I_s}{\sqrt{2}} = 0.707 I_s \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} i_q &= I_s \cos 45^\circ = \frac{I_s}{\sqrt{2}} = 0.707 I_s \\ \text{i.e. } i_d &= i_q \end{aligned} \quad (3.3)$$

Now, for Negative speed command, reference torque will be negative and hence  $I_s$  cannot be determined. Hence a lookup table can be generated in the following approach to generate the current reference  $I_s^*$  for all values of  $T_{em}^*$ .

$$\begin{aligned} I_s^* &= -\frac{1}{\sqrt{K}} \times \sqrt{|T_{em}^*|} \quad \text{for } T_{em}^* < 0 \\ I_s^* &= \frac{1}{\sqrt{K}} \times \sqrt{T_{em}^*} \quad \text{for } T_{em}^* \geq 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

The current reference  $I_s^*$  as a function of  $T_{em}^*$  is shown in the following figure –

The MTPA Control Block diagram is shown in Fig.3. –

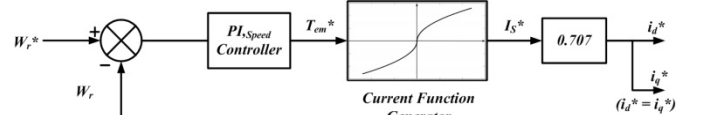


Fig. 3 Close Loop speed control Scheme for MTPA operation

### IV. FIELD WEAKENING OPERATION

Field Weakening Equation can be obtained by combining eq. (2.1), (2.2) and (2.6) –

$$\begin{aligned} V_d &= R_s i_d + s L_d i_d - \omega_e L_q i_q \\ V_q &= R_s i_q + s L_q i_q + \omega_e L_d i_d \\ V_{s,max}^2 &= V_d^2 + V_q^2 = (\omega_e L_q i_q)^2 + (\omega_e L_d i_d)^2 \\ V_{s,max}^2 &= \omega_e^2 L_q^2 I_s^2 \cos^2 \gamma + \omega_e^2 L_d^2 I_s^2 \sin^2 \gamma \\ V_{s,max}^2 &= \omega_e^2 I_s^2 (L_q^2 \cos^2 \gamma + L_d^2 \sin^2 \gamma) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_{s, \max}^2 &= \omega_e^2 I_s^2 [L_q^2 - L_q^2 \sin^2 \gamma + L_d^2 \sin^2 \gamma] \\
\sin^2 \gamma &= \frac{V_{s, \max}^2 - \omega_e^2 L_q^2 I_s^2}{\omega_e^2 I_s^2 (L_d^2 - L_q^2)} \\
\gamma_{FW} &= \sin^{-1} \sqrt{\frac{V_{s, \max}^2 - \omega_e^2 L_q^2 I_s^2}{\omega_e^2 I_s^2 (L_d^2 - L_q^2)}} \quad (4.1)
\end{aligned}$$

Eq. (4.1) is the governing Field Weakening equation as a function of Motor speed. Using this equation, the angle ( $\gamma_{FW}$ ) between d and q axis currents for a particular speed is calculated and hence the reference currents  $i_d^*$  and  $i_q^*$  for Field Weakening are generated. It is to be noted that, this equation is to be used only when the speed is greater than base speed. Comparator control logic is needed for this purpose. The control block schematic is shown in Fig.4.

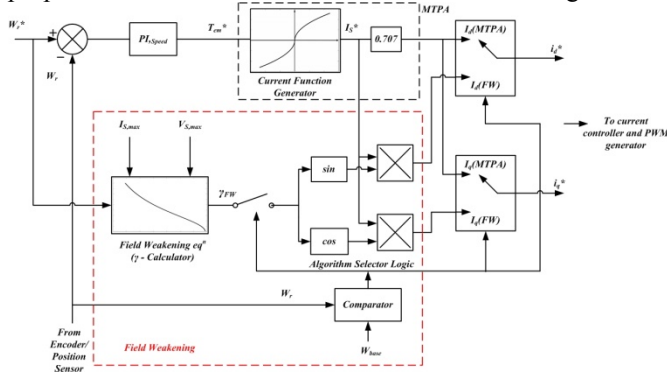


Fig. 4 Field Weakening Control Implementation for SynRel Motor

The operation of MTPA and FW of the motor can be shown together using the  $i_d$  vs  $i_q$  plot as in Fig.5. OA is the locus for MTPA operation whereas AB is the FW locus. A is the point that corresponds to base speed of the motor and B represents the maximum speed of the motor. The voltage ellipse shrinks as the speed of the motor increases. B is the point where the Current circle and voltage ellipse touches each other and hence this is the maximum speed point. If the voltage further shrinks then there is no point of intersection between them and hence no valid point of operation would exist. So from zero to maximum speed the operation of the motor would traverse through the locus O to A to B, where O to A is MTPA and A to B is FW operation.

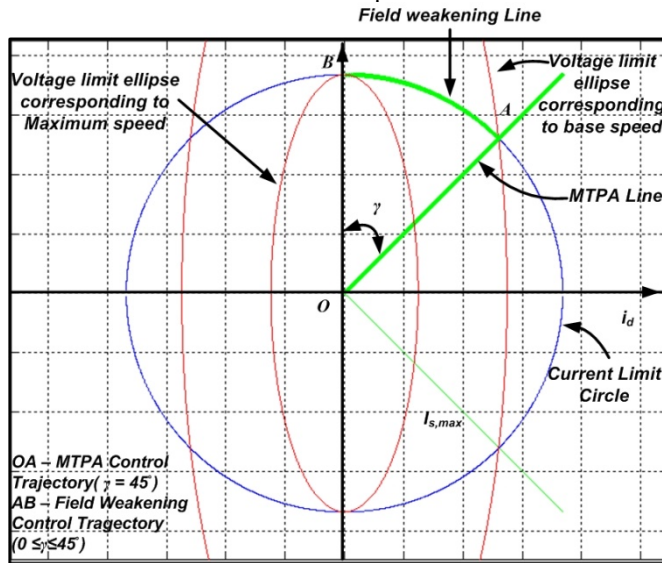


Fig. 5 Region of operation in MTPA and Field Weakening mode

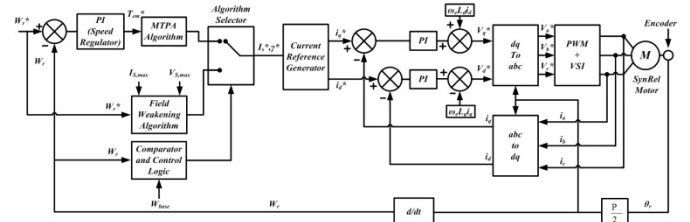


Fig. 6 Overall Schematic of Field Oriented Control of SynRel Motor with MTPA and Field Weakening operation

## V. SIMULATION AND DISCUSSION

The developed algorithms are simulated in MATLAB and SIMULINK. The simulation results shown here are divided into two sections. The first sets of results are for MTPA operation with rated load condition. The second sets of results are for Field weakening operation up to maximum Motor speed with no load condition.

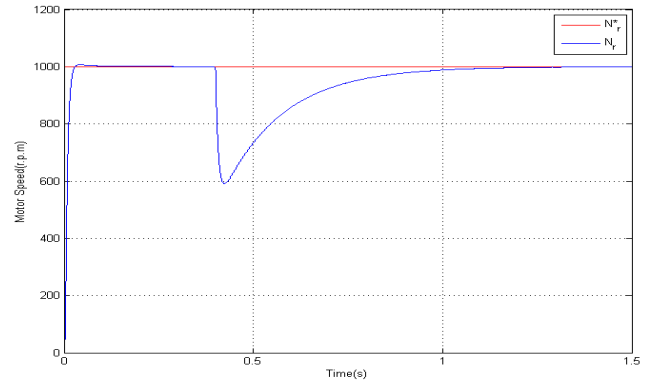
A wide speed range SynRel Motor used for EPS (Electrical Power Steering) application is taken as reference to verify the algorithm as given in [2]. The motor parameters are given in the Appendix.

### A. MTPA Operation at Rated Load

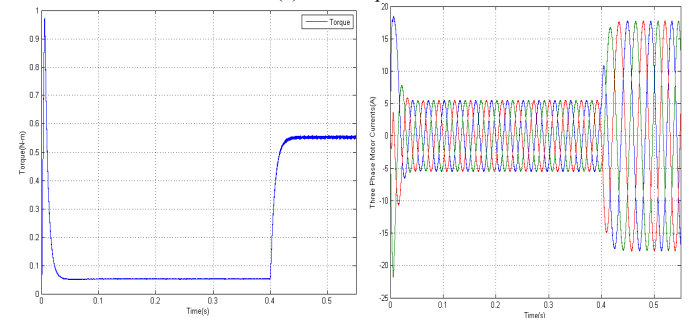
The motor is to operate at its base speed of 1000rpm with rated load of 0.6Nm. The load torque is applied at the instant of 0.4 second.  $N_r^*$  is the reference speed and  $N_r$  is the actual motor speed. The result shows that the speed control loop is capable of tracking the speed precisely as well as compensating the disturbance that occurs due to the application of load torque.

The other parameters like generated Torque, d and q axis currents and three phase Motor currents are also plotted. It is seen that the peak starting torque is around 0.98 Nm which is acceptable for the chosen motor.

Depending on the peak torque handling capability, the Speed Controller Bandwidth can be chosen to obtain the desired response.



(a) Motor Speed



(b) Torque

(c) Three phase Currents

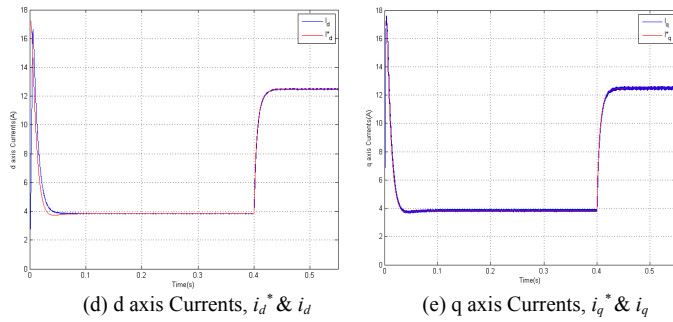


Fig. 7 Motor characteristics and parameters in MTPA operation

### B. Field Weakening Operation

The motor responses under Field weakening operation are as follows-

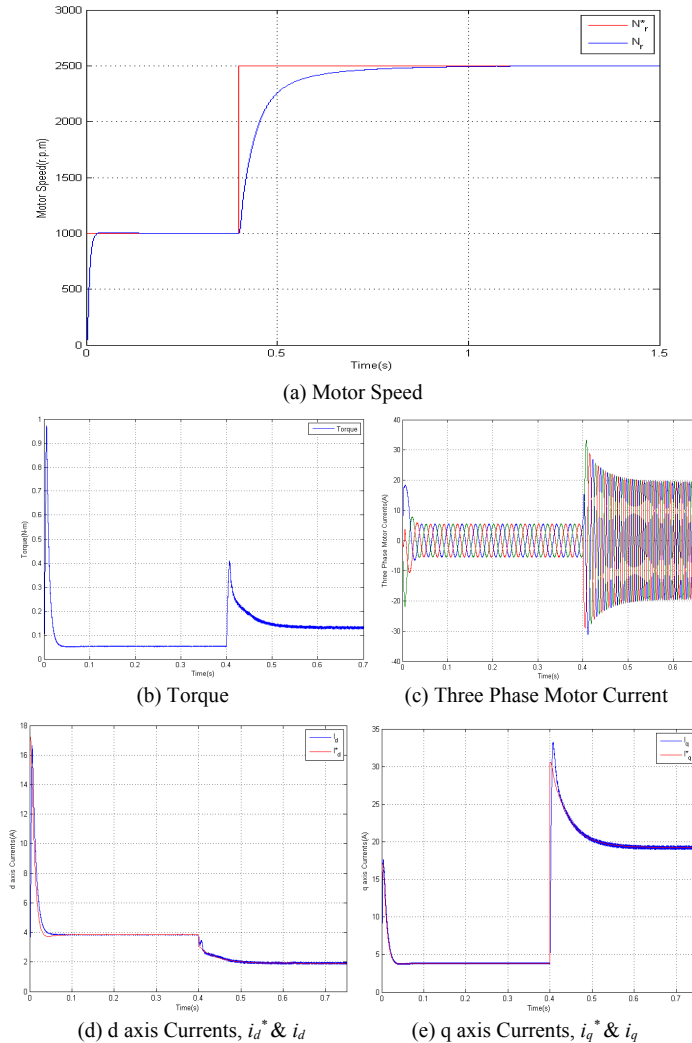


Fig. 8 Motor characteristics and parameters in Field Weakening operation

In Field Weakening operation there are some overshoot in the transient condition which can be limited by using a saturation block. Here, for this particular motor, the overshoot was allowed because this transient peak power is less than the maximum power of the motor.

### VI. CONCLUSIONS

The developed algorithms can successfully work on MTPA and Field weakening region. However, two limitations of the algorithm can be pointed out. Firstly, the algorithm is parameter dependent. So any variation in  $L_d$  and  $L_q$  or  $R_s$  will deteriorate the performance. It is quite obvious that the parameters will not remain constant for a SynRel

motors as the variation of inductances is quite prominent as a function of motor current. At the same time the speed and current controller performance will also be hampered due to this parametric variation and hence affect the overall operation of the motor. Secondly, the dynamic model is developed neglecting the core loss which may not be neglected in practical implementation. The effect of core needs to be taken in to account and modelled accordingly for high dynamic performance [1]. As a result the developed algorithm of for MTPA will not be valid and a different approach will be needed for MTPA operation of the motor. To overcome the issues associated with these two crucial points can be a very good topic for further future work of the presented paper.

### APPENDIX

TABLE I  
MOTOR PARAMETERS

Parameter	Value
Rated Power	60W
Maximum Power	150W
Rated Torque	0.6Nm
Base Speed	1000rpm
Maximum Speed	2500rpm
Number of Poles	4
Rated Current	18.5A
Inverter DC Link Voltage	12V
Stator Resistance (per phase)	0.11Ω
d-axis Inductance (at rated current)	1.78mH
q-axis Inductance (at rated current)	0.6mH
Current Controller Bandwidth	300Hz
Speed Controller Bandwidth	10Hz

### REFERENCES

- [1] E.M.Rashad, T.S.Radwan, M.A.Rahman, "A Maximum Torque per Ampere Vector Control Strategy for Synchronous Reluctance Motors Considering Saturation and Iron Losses", in Proc. IAS, 2004, vol.1, pp.2411-2417.
- [2] J. Ahn, S.-B. Lim, K.-C. Kim, J. Lee, J.-H. Choi, S. Kim and J.-P. Hong, "Field weakening control of synchronous reluctance motor for electric power steering," IEEE IET Elec. Power Appl. vol. 1, no. 4, pp.565-570, 2007.
- [3] Y. Inoue, S. Morimoto, and M. Sanada, "A Novel Control Scheme for Maximum Power Operation of Synchronous Reluctance Motors Including Maximum Torque Per Flux Control," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 1, pp.115-121, 2011.
- [4] I.Boldea, L. N. Tutelea, L. Parsa, and D. Dorrell, "Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, pp. 5696-5711, Oct. 2014.
- [5] S. Taghavi and P. Pillay, "A sizing methodology of the synchronous reluctance motor for traction applications," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 2, no. 2, pp. 329-340, Jun. 2014.
- [6] D. A. Staton, T. J. E. Miller, and S. E. Wood, "Maximizing the saliency ratio of the synchronous reluctance motor," in Proc. Inst. Elect. Eng. Elect. Power Appl., vol. 140, no. 4, pp. 249-259, Jul. 1993.
- [7] T.-S. Kwon and S.-K. Sul, "Novel flux-weakening control of an IPMSM for quasi-six-step operation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 6, pp. 1722-1731, Sep./Oct. 2008.
- [8] T. M. Jahns, "Flux-weakening regime operation of an interior permanent magnet synchronous motor drive," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 1A-23, no. 4, pp. 681-689, Jul./Aug. 1986.
- [9] Seog-Joo Kang, Seung-Ki Sul, "Highly Dynamic Torque Control of Synchronous Reluctance Motor," in Proc. IEEE Power Electronics Specialist Conference, vol. 2, pp. 1793-1797, 1996.
- [10] Milutin G. Jovanovic, Robert E. Betz, "Maximum Torque Control of a Sensorless Synchronous Reluctance Motor Drive," in Proc. IEEE Ind. Appl., vol. 1, pp. 637-644, 1997.
- [11] R. Lagenpist, I. Boldea, T.J.E. Miller, "Sensorless Control of the Synchronous Reluctance Motor," IEEE Tran. on Ind. Appl. vol. 30, no. 3, pp. 673-682, 1994.